



Observation et modélisation spatiale du climat aux échelles fines dans un contexte de changement climatique

Hervé Quénol

► To cite this version:

Hervé Quénol. Observation et modélisation spatiale du climat aux échelles fines dans un contexte de changement climatique. Géographie. Université Rennes 2, 2011. tel-00694300

HAL Id: tel-00694300

<https://theses.hal.science/tel-00694300>

Submitted on 4 May 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Habilitation à Diriger des Recherches
UNIVERSITÉ DE RENNES 2 HAUTE-
BRETAGNE

sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne
Mention : Géographie

Ecole doctorale des Sciences Humaines et
Sociales

présentée par
Hervé Quénol

Préparée à l'Unité Mixte de Recherche 6554
LETG du CNRS
Université de Rennes 2 Haut-Bretagne

Observation et modélisation spatiale du climat aux échelles fines dans un contexte de changement climatique

Volume 1 : Position et projet scientifique

Habilitation à Diriger des Recherches soutenue le 16 décembre 2011
devant le jury composé de :

Hervé Le Treut
Professeur - Université Pierre et Marie Curie, Paris / *rapporteur*

Bernard Seguin
Directeur de Recherche - INRA, Avignon / *rapporteur*

Sylvain Bigot
Professeur - Université Joseph Fourier, Grenoble / *rapporteur*

Andrew Sturman
Professeur - University of Canterbury, Christchurch / *examinateur*

Vincent Dubreuil
Professeur - Université Rennes 2 Haute Bretagne, Rennes / *examinateur*

Gérard Beltrando
Professeur - Université Denis Diderot, Paris / *examinateur*

Jean-Philippe Boulanger
Directeur de Recherche - IRD, Buenos Aires / *examinateur*

Ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches présente le bilan des travaux que je mène depuis mon post doctorat à la Faculté des Lettres de Porto (2002-2003) et mon recrutement au laboratoire COSTEL (UMR6554 LETG) en tant que Chargé de Recherches (CR) CNRS. Ces travaux s'inscrivent principalement dans les programmes ANR-JC-TERVICLIM (*Observation et modélisation spatiale du climat à l'échelle des terroirs viticoles*) et GICC-TERADCLIM (*Adaptation des terroirs viticoles au changement climatique*) menés au sein du laboratoire COSTEL de l'université Haute Bretagne Rennes 2.

L'originalité de ces programme réside d'une part dans la mise en place d'un réseau unique de capteurs et de stations météorologiques dans divers vignobles évoluant sous des macro-climats différents ; et d'autre part dans l'utilisation et la combinaison de deux méthodes de modélisation climatique (géostatistique et atmosphérique).

La force de ce programme, pour traiter l'analyse multi sites et la modélisation du climat aux échelles fines a été de mettre en place des collaborations ou de développer des collaborations existantes entre des géographes-climatologues, des physiciens de l'atmosphère, des chercheurs en sciences des techniques de l'information et de la communication (SIG), des agronomes, des chercheurs en sciences de la société et des « acteurs » (ex : politiques, agriculteurs, ...). Ainsi, l'ANR-JC-TERVICLIM est le parfait exemple de la mise en place de ce type d'étude pluridisciplinaire.

Ce programme a débuté en 2008 dans 4 vignobles expérimentaux (Val de Loire, Afrique du Sud, Champagne et Chili) avec une équipe d'une dizaine de personnes composées de géographes-climatologues, d'agronomes et de physiciens de l'atmosphère. Aujourd'hui, l'équipe des composée d'une cinquantaine de scientifiques (13 nationalités) ayant des compétences complémentaires. Sur les vingt vignobles expérimentauxⁱ, dix-sept ont été équipés en stations et capteurs météorologiques, ce qui représente un réseau de plus de 300 instruments qui enregistrent les données météorologiques toutes les heures.

Les résultats des mesures et de la modélisation adaptée à l'échelle des terroirs ont permis de mettre en évidence une forte variabilité spatiale du climat sur des espaces très restreints. Au niveau des températures, les différences spatiales engendrées par les conditions locales (topographie, ...) sont très souvent supérieures à l'augmentation de températures simulée par les différents scénarios du GIEC pour les 50 années à venir. Les vignerons s'adaptent à cette variabilité spatiale du climat qui détermine en partie les caractéristiques et la typicité de leur vin. Dans le contexte du changement climatique, cette démarche d'analyse spatiale peut être une méthode d'adaptation à l'évolution temporelle du climat notamment à court et à moyen terme.

Le bilan de ces travaux sur les climats à l'échelle des terroirs montre que nous avons mis en place une méthode de mesures et de modélisation appliquée à différents vignobles répartis dans le monde. Cette approche généralisée sur différents sites est originale car ce type d'étude est souvent effectué sur un unique site. Même si la

multiplicité des sites peut faire craindre à des problèmes de gestion notamment pour l'analyse des données, cette approche scientifique généralisée et ce réseau de mesures disposé en fonction des caractéristiques locales sont des outils précieux pour l'observation et la validation des simulations du climat futur à l'échelle des terroirs viticoles.

Par conséquent, les perspectives futures de ces travaux de recherches sont d'une part, de pérenniser et moderniser ce réseau de mesures (développement d'un système de transmission de données en direct et mise à disposition des données sur une plateforme web) afin qu'il fonctionne le plus longtemps possible et d'autre part, d'intégrer les scénarios du changement climatique dans les modèles climatiques adaptés aux échelles fines. Cela s'inscrit nécessairement dans la continuité des programmes de recherches évoquées ci-dessus, avec le maintien de l'équipe pluridisciplinaire de chercheurs en France et à l'étranger et un transfert des résultats vers les acteurs.

Cette démarche scientifique nécessite des efforts de compréhension et d'adaptation entre les différentes disciplines notamment sur les questions d'incertitude au niveau des résultats de modélisations obtenus.

Les grandes améliorations au niveau de la compréhension du climat global au climat régional et l'augmentation des moyens de calcul font que les biais au niveau des sorties de modèles du changement climatique diminueront. Les différentes méthodes d'analyse et de modélisation du climat développées par les différentes disciplines concernées sont indispensables même si les résultats actuels sont perfectibles. Dans cette optique, le projet se situe au carrefour entre la physique de l'atmosphère et la climatologie régionale au service des agronomes et des acteurs pour la valorisation des connaissances climatiques des terroirs viticoles.

Les travaux présentés dans ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches n'auraient jamais pu être réalisés sans les différentes collaborations évoquées ci-dessus. Je tiens à remercier mes collègues et amis du laboratoire COSTEL (Sam, Vincent(s), Olivier, Jean, ...) et de l'équipe TERVICLIM (Gérard(s), Andy, Jocelyne, Luis, Wilmar, Cyril, ...). Un grand merci à tous les jeunes chercheurs (Cyril, Elodie, Viviana, Xavier, Mercedes, ...) qui participent à ces travaux et sans lesquels cela seraient impossibles.

Je tiens également remercier très chaleureusement Valérie et Malika qui ont une part très importante dans ce travail de recherche et avec lesquelles c'est toujours un grand plaisir de faire des missions sur le terrain en Amérique du Sud et en Afrique du Sud (vive le *Malbec* et le *Pinnotage* !!!!!).

Tous mes remerciements aux membres du jury pour leur disponibilité et leurs conseils.

Naturellement, un grand merci à Sylvain pour son aide et sa bonne humeur notamment lorsque nous nous retrouvons à l'AIC.

Pour finir, un grand merci à mes parents et mes amis (du TCV et de COSTEL) qui m'ont aidé quand j'en ai eu besoin !!!!!

Toutes mes pensées et mes sentiments à Celle qui m'accompagne et qui me laisse vivre pleinement ma passion de géographe de terrain.

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| Introduction | 1 |
| 1. Mesures et spatialisation du climat aux échelles fines | 5 |
| 1.1 Une question d'échelles | 5 |
| 1.2 Analyse du climat aux échelles fines | 7 |
| 1.2.1 Une méthodologie multiscalaire | |
| 1.2.2 Une disposition spécifique du matériel de mesures | |
| 1.2.3 Exemple d'un dispositif de mesures agroclimatiques | |
| 1.3 Validation des observations climatiques | 14 |
| 1.4 Spatialisation et modélisation adaptées aux échelles fines | 17 |
| 1.4.1 Modélisation géostatistique | |
| 1.4.2 Modélisation numérique à méso-échelles | |
| 2. Observation et modélisation spatiale du climat à l'échelle des terroirs viticoles | 23 |
| 2.1 Les terroirs viticoles et le changement climatique | 24 |
| 2.1.1 Les terroirs viticoles | |
| 2.1.2 Relation vigne/climat : un bon indicateur du changement climatique | |
| 2.1.3 La question de l'adaptation | |
| 2.2 Des mesures agro-climatiques adaptées à l'échelle des terroirs | 29 |
| 2.2.1 Les vignobles expérimentaux | |
| 2.2.2 L'acquisition des données agroclimatiques | |
| 2.2.3 Evolution des températures et des indices bioclimatiques à l'échelle des régions viticoles étudiées | |
| 2.2.4 Application au vignoble du Val de Loire | |
| 2.2.4.1 Températures et indices bioclimatiques à l'échelle du Val de Loire | |
| 2.2.4.2 Températures et phénologie de la vigne à l'échelle de l'Anjou et du Saumurois | |
| 2.2.4.3 Températures et indices bioclimatiques à l'échelle du « Quart de Chaumes » | |
| 2.3 Modélisation climatique adaptée aux terroirs viticoles : Application aux vignobles de Stellenbosch (Afrique du Sud) | 58 |
| 2.3.1 Contexte : des études scientifiques adaptées aux terroirs | |
| 2.3.2 Résultats des modélisations climatiques | |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 2.3.2.1 | <i>Des forts contrastes thermiques nocturnes</i> | |
| 2.3.2.2 | <i>Modélisation numérique méso-échelles</i> | |
| 2.3.2.3 | <i>Approche géostatistique</i> | |
| 2.4 | Intégration des sorties de modèles globaux dans un modèle méso-échelles | 67 |
| 2.4.1 | <i>Contexte</i> | |
| 2.4.2 | <i>Données et méthodes</i> | |
| 2.4.3 | <i>Résultats : des simulations affinées par la modélisation numérique méso-échelles</i> | |
| 3. | Perspectives et projet de recherche | 73 |
| 3.1 | Modernisation et pérennisation des réseaux de mesures | 74 |
| 3.2 | Intégration des scénarios du changement climatique dans les modèles « échelles fines » et adaptation au changement climatique à l'horizon 2100 | |
| 3.2.1 | <i>Scénarios du changement climatique à l'échelle des terroirs</i> | |
| 3.2.2 | <i>Scénarios d'adaptation par Système Multi-agents</i> | |
| 3.3 | Valorisation et transfert vers les acteurs et sensibilisation aux effets du changement climatique | 77 |
| 3.4 | Applications futurs : au-delà la vigne... entre monde agricole et milieux urbains | 79 |
| | Bibliographie | 81 |

Introduction

Depuis la fin des années 1980, la communauté scientifique internationale s'intéresse au changement climatique global et s'interroge sur ses impacts futurs à l'échelle planétaire. Les différents rapports du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) ont alerté la communauté internationale d'une augmentation de la température ainsi que de la fréquence et de l'intensité des aléas climatiques au niveau mondial (GIECC, 1990, 1995, 2001 et 2007). Même s'il existe de nombreuses incertitudes sur l'intensité du changement climatique et ses conséquences, l'amélioration de la fiabilité des Modèles de Circulation Générale du climat (MCG) et la corrélation positive entre les rejets de Gaz à Effet de Serre (GES) et l'augmentation des températures de ces dernières décennies montrent que le réchauffement global sera compris entre 2 et 6°C (selon les scénarios et les modèles) à l'horizon 2050-2100 (Pachauri et Reisinger, 2007). Les impacts sur l'Homme ou les territoires, aux échelles globales et régionales, estimés à partir des MCG indiquent une augmentation des calamités climatiques telles que l'augmentation des sécheresses, de la fréquence et de l'intensité des épisodes de vagues de chaleur, etc. (Redelsperger *et al.*, 2006). Ces évolutions pourront avoir de lourdes conséquences sur les écosystèmes et sur les sociétés notamment en matière de sécurité alimentaire et de malnutrition (Projet AMMA Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine). Les premiers résultats de ces programmes de recherche ont été obtenus principalement à partir de la modélisation numérique et grâce à des collaborations internationales entre les physiciens de l'atmosphère, les géophysiciens et les sciences de l'environnement. Mais très peu de géographes-climatologues ont participé à ces études. Comme l'indique Beltrando (2010), *« les géographes-climatologues se sont majoritairement intéressés à la description et l'explication de la variabilité du climat à diverses échelles de temps et d'espace sur des périodes écoulées. Ils se sont moins investis sur les formes d'adaptations tenant compte des résultats des simulations du climat futur, tel qu'il est envisagé à partir des calculs obtenus par les modèles numériques du climat »*. Cela en partie, à cause du *« manque de précision et de fiabilité accordé aux résultats produits par les modèles conçu par les physiciens de l'atmosphère, aux échelles des territoires occupés par les sociétés humaines »* d'où, le scepticisme d'une partie de la communauté des géographes sur l'origine et les effets du changement climatique.

Pourtant, les géographes-climatologues, de part leurs compétences en terme d'analyse de données climatiques, de la connaissance du « terrain » et des méthodes de spatialisation de données climatiques basées sur les relations avec les caractéristiques environnementales (ex : méthodes géostatistiques, outils tels que la géomatique, ...) aux échelles régionales voire locales commencent à s'impliquer et à être impliqués dans les études d'impact du changement climatique que ce soit dans le domaine de la validation des sorties de modèles ou de l'adaptation à plus ou moins long terme (Bigot et Rome, 2010 ; Bonnardot *et al.*, 2011 ; Lamy et Dubreuil, 2011). En effet, même si les simulations climatiques pour le futur abordent des échelles relativement larges, de réels progrès ont été réalisés au niveau de la résolution des sorties des modèles. Comme

l'indique Le Treut (2010) « *malgré la convergence des modèles vers des résultats largement partagés et qui semblent signifiants à grande échelle, deux types d'incertitudes demeurent, correspondant à la fois à l'amplitude et à la localisation (dans le temps ou dans l'espace) des effets attendus. Il est encore impossible de répondre à des questions précises telles que : quels seront les impacts locaux les plus importants et comment s'en protéger ? [...] Une meilleure prévision des évolutions climatiques locales constitue donc un enjeu essentiel, pour lutter et nous adapter à des évolutions dont une part est inévitable* ».

C'est certainement sur la question de l'analyse et de la modélisation des climats régionaux et locaux que les géographes-climatologues pourront apporter leurs compétences pour l'amélioration des connaissances sur l'impact du changement climatique sur l'Homme et ses activités. Cela passe nécessairement par une démarche pluridisciplinaire avec notamment des collaborations au niveau scientifique, entre les physiciens de l'atmosphère, les sciences des techniques de l'information et de la communication (SIG), les agronomes, les sciences de la société ... et avec les « acteurs » (ex : politiques, agriculteurs, ...) sur le plan du transfert de l'information.

Dans l'optique d'étudier l'impact du changement climatique aux échelles fines que ce soit au niveau des mesures ou de la modélisation, notre démarche consiste à installer des réseaux de mesures adaptées aux échelles fines qui permettront d'étudier les climats locaux en relation avec les activités humaines concernées et en fournissant des données à échelles fines qui permettront de participer à l'amélioration actuelle de la résolution spatiale des modèles notamment par l'intermédiaire de la validation des données. A plus long terme, ces réseaux (notamment ceux mis en place dans le cadre des programmes ANR-JC-TERVICLIM, GICC-TERADCLIM et ECORURB) auront pour vocation à être complétés et surtout être pérennisés afin d'obtenir une base de données climatiques adaptée aux échelles locales qui pourra être utilisée dans le futur pour réaliser des analyses en relation avec le changement climatique.

Cette démarche scientifiques et les réseaux de mesures mis en place dans le cadre d'étude de climatologie appliquée font très souvent appel à une demande sociétale (ex : Plan Climat pour la lutte contre le changement climatique en ville, lutte contre les calamités agro climatiques, ...) sur les questions d'adaptation au changement climatique, à court, moyen et long terme.

Pour ce travail d'Habilitation à Diriger des Recherches, seront présentés successivement :

- la méthodologie mise en place pour l'analyse et la modélisation du climat aux échelles fines en montrant notamment comment ce type de démarche scientifique peut être un apport pour l'analyse de l'impact du changement climatique sur nos sociétés ;
- des applications concrètes dans le domaine de la viticulture mondiale avec les programmes ANR-JC-TERVICLIM et GICC-TERADCLIM portant sur « l'observation et la modélisation du climat à l'échelle des terroirs viticoles dans le contexte du changement climatique » ;

- puis, les perspectives de recherches dans le domaine de l'analyse et de la modélisation climatique aux échelles fines et les adaptations possibles au changement climatique.

1. Mesures et spatialisation du climat aux échelles fines

1.1 Une question d'échelles

Aux échelles fines, les conditions atmosphériques au niveau de la couche limite sont tributaires des conditions de surface (Yoshino, 1975 ; Oke, 1987). La morphologie, les aspérités et la nature de la surface définies par le relief, la végétation ou par diverses infrastructures humaines, modifient le comportement des variables météorologiques et caractérisent à terme le microclimat (Quénol, 2002). Cela explique en partie l'importante variabilité spatiale du climat rencontrée sur des espaces relativement restreints surtout dans des milieux avec une topographie accidentée ou avec de multiples obstacles. L'hétérogénéité de la surface engendrant une forte variabilité météorologique et climatique locale au niveau de la couche limite de l'atmosphère, la hiérarchisation des éléments « perturbateurs du climat » suivant l'emboîtement des échelles spatiales est essentielle. Les raisons de cette approche sont liées au fonctionnement de l'atmosphère. Sachant qu'une même masse d'air générant un même type de temps peut concerner un territoire étendu il est certain que sur une entité spatiale plus petite des caractères communs sont présents. Plus le niveau d'observation s'affine plus le nombre d'éléments influant sur les paramètres météorologiques est grand. Les classifications de hiérarchisation des échelles sont nombreuses et sont déterminées par des ordres de grandeur spatiaux ou temporels suivant lesquels on étudie les phénomènes climatiques (Orlandsky, 1975). Par exemple, Choissnel (1987) considère que « *le raisonnement climatique doit prendre en compte la notion d'échelles d'espace imbriquées et respecter un ordre chronologique* » suivant le climat régional (influence de quelques dizaines de km) puis le topoclimat (1 km en montagne et 10 km en plaine) et enfin le microclimat (de 100 m à quelques cm) (figure 1).

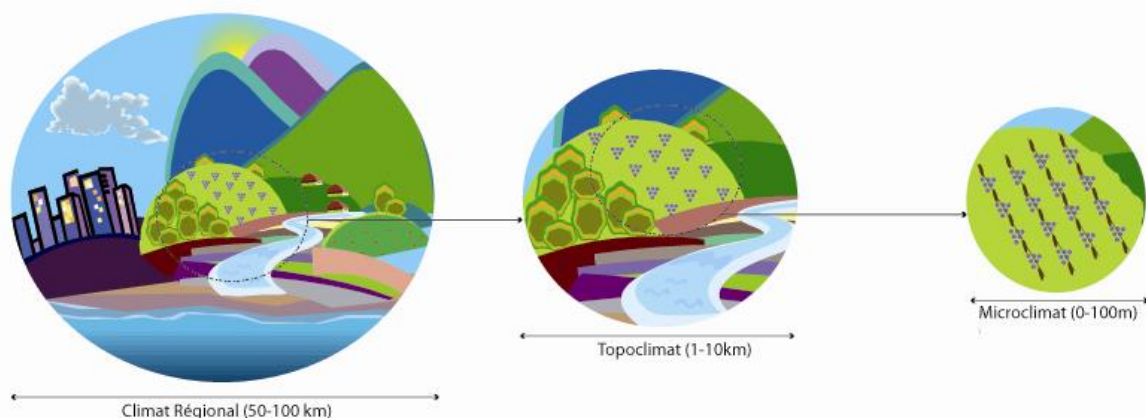


Figure 1 : Classification des échelles spatio-temporelle selon des ordres de grandeur (adapté d'après Choissnel, 1987)

La hiérarchisation des échelles spatio-temporelles suivant des ordres de grandeur permet d'appliquer la même classification pour des terrains d'études différents. Or, en climatologie appliquée aux échelles fines, ce type classification n'est

pas suffisamment précis. En effet, entre l'échelle « topoclimatique » et « microclimatique », il y a une multitude d'éléments « perturbateurs » du climat qu'il faut hiérarchiser.

La hiérarchisation des différents éléments du milieu est réalisée suivant une démarche systémique. La figure 2 montre le fonctionnement du milieu suivant les différents éléments qui le composent : atmosphère, topographie, hydrologie, phytologie, obstacles et activités anthropiques, ... Chaque composante est inter-reliée avec les autres, c'est-à-dire que si une des composantes subit une modification, cela aura des répercussions sur les autres. Prenons l'exemple du gel printanier au moment de la reprise de croissance de la vigne ou des arbres fruitiers. A cette période, ces cultures sont très sensibles aux températures négatives (Guyot, 1997 ; CITFL, 1998). Au cours d'une nuit gélive de type radiatif (situation anticyclonique avec ciel clair et vent faible), la variabilité spatiotemporelle des températures est généralement très importante sur des espaces restreints : les températures les plus froides sont observées dans les dépressions ou en amont d'obstacles où l'air froid peut s'accumuler et stagner (Quénol, 2002). Si les bourgeons, vulnérables aux basses températures, se situent dans les secteurs où les températures sont les plus froides, le risque de gel est très important. La combinaison entre la forte variabilité de l'aléa climatique et la vulnérabilité du végétal engendre une localisation très précise du risque gélif et des conséquences économiques que cela peut avoir avec la destruction d'une partie de la récolte. Par conséquent, certaines parcelles aura quasiment 100% de dégâts alors qu'une parcelle voisine restera intacte. Généralement, l'agriculteur s'adapte soit en plantant une variété peu sensible au gel, soit en installant un système de lutte antigel (ex : aspersion d'eau, tour à vent) (Quénol, 2002). Ce fonctionnement systémique de la variabilité spatiale du climat aux échelles fines est le même dans d'autres domaines que l'agriculture. En climatologie urbaine, il a été observé que les températures sont très variables d'un quartier à un autre suivant la situation atmosphérique, la « position » de la ville (ex : fond de vallée, proximité de la mer, ...), les caractéristiques du bâti (ex : type de bâti, hauteur, nature des matériaux, ...), la proportion et la localisation d'espaces végétalisés et les activités humaines (Quénol *et al.*, 2010). Lors d'une vague de chaleur, l'exposition au risque sanitaire pour les populations vulnérables varie fortement suivant ces caractéristiques locales.

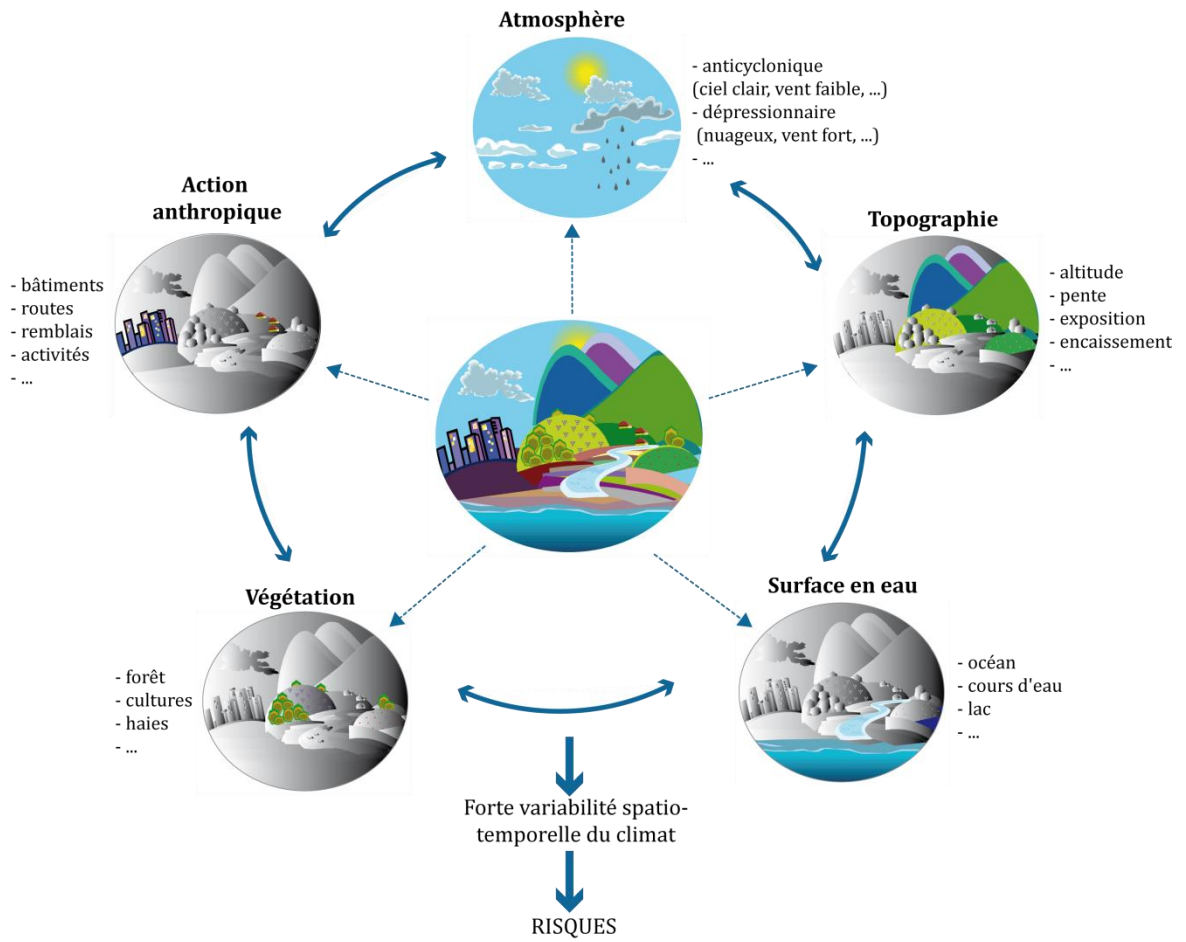


Figure 2 : Approche systémique de la variabilité climatique aux échelles locales.

Dans cette logique de hiérarchisation des composantes du milieu, une étude de climatologie aux échelles fines nécessite la mise en place d'une méthodologie de mesures et de modélisation prenant en compte l'imbrication des échelles spatiales et temporelles.

1.2 Analyse du climat aux échelles fines

1.2.1 Une méthodologie multiscalaire

L'observation du climat aux échelles fines implique donc une méthode d'acquisition des données météorologiques adaptée. A l'échelle « régionale » où la localisation des stations obéit à des normes officielles permettant de limiter l'impact des perturbations locales³, les données (validées et homogénéisées) des réseaux nationaux sont utilisées. Aux échelles plus fines où l'objectif est de déterminer l'influence du milieu sur les variables météorologiques, l'emplacement des postes de mesures ne peut pas être défini en fonction des normes standards mais suivant l'emboîtement des échelles spatiales auxquelles les différents éléments de la surface sont susceptibles de modifier le climat local. Les stations météorologiques des réseaux nationaux permettent d'obtenir des

³ Selon l'Organisation Mondiale de Météorologie (1990), « La station météorologique doit être située en terrain dégagé, éloignée des bâtiments et des rideaux d'arbres de plus de 10 fois leur hauteur ».

informations en continu et simultanément sur plusieurs points de l'espace, mais ce réseau est peu adapté aux expérimentations climatiques aux échelles fines. La densité du réseau météorologique est trop lâche pour mettre en évidence la variabilité spatiale du climat aux échelles fines et l'emplacement des stations météorologiques n'est pas déterminé spécifiquement suivant la problématique des expérimentations. Face à l'insuffisance du réseau classique, l'observation de la variabilité des paramètres météorologiques aux échelles fines passe donc par la mise en place d'un réseau de mesures adapté à la configuration du milieu et aux problématiques d'études de climatologie appliquée.

Suivant cette démarche, deux types de données météorologiques issus de réseaux météorologiques imbriqués sont utilisés :

- (1) Les données des réseaux météorologiques nationaux ou régionaux. Ces données permettent d'étudier la variabilité spatio-temporelle du climat à l'échelle régionale mais également d'analyser les évolutions dans le temps afin de déterminer des ruptures statistiques des données météorologiques dans le contexte du changement climatique (lorsque les séries sont suffisamment longues). Par exemple, en France, nous utilisons les données météorologiques des stations de *Météo-France*.
- (2) Les données de réseaux fixes de stations ou de capteurs météorologiques installés spécifiquement dans le cadre d'études climatiques appliquées aux échelles fines. Contrairement aux réseaux météorologiques nationaux ou régionaux où la localisation des stations météorologiques doit éviter au maximum les obstacles, la répartition des appareils de mesures est réalisée en fonction des facteurs locaux (ex : topographie, ...). Cela passe donc par la mise en place de nombreux postes de mesures afin de quadriller au mieux le terrain d'étude. Les données sont obtenues soit simultanément sur divers points du site avec des stations et capteurs météorologiques enregistrant les données suivant un pas de temps défini, soit ponctuellement par l'intermédiaire de mesures itinérantes. Les mesures itinérantes ont l'avantage d'être illimitées au niveau du nombre de postes de mesures, en revanche, le décalage entre chaque prise de mesures constitue une source d'incertitude majeure au niveau de la qualité des données et de l'interprétation des résultats. L'avantage des mesures simultanées est de pouvoir obtenir des données de terrain sans décalage temporel sur les prises de mesures et surtout avec une résolution temporelle similaire aux données issues des réseaux nationaux. Le principal problème de ce type de mesures est le coût des appareils qui limite le nombre de postes d'observation (Quénol, 2002). Mais aujourd'hui, le développement commercial des capteurs reliés à des Data Loggers, permet d'obtenir du matériel de bonne qualité (principalement pour la température) pour un coût relativement bon marché.

1.2.2 Une disposition spécifique du matériel de mesures

La forte variabilité spatiotemporelle du climat sur de petits espaces induit que le choix des appareils de mesures et leur installation sont très importants afin de limiter les incertitudes liées à l'étalonnage, à la résolution des capteurs ou à leur positionnement. Nous avons testé de nombreux appareils de mesures (stations météorologiques et *data loggers*). Ce ne sont pas obligatoirement les appareils les plus onéreux et les plus précis qui se sont avérés les plus fiables pour ce type d'étude. Par exemple, certains capteurs de température ont une résolution de 0,1°C mais lorsqu'on les compare les uns avec les autres, des écarts sont observés et ceux-ci sont variables suivant la « gamme » de température. Par exemple, nous avons observé un écart de 0,7°C pour des températures comprises entre 0 et 3°C et un écart de 0,4°C entre 5 et 7°C. Ce type de capteurs est donc difficilement comparable. Nous utilisons les Data Loggers *Tinytag* qui ont une résolution de mesures de 0, 3°C et sont étalonnés en laboratoire. Nous faisons un étalonnage sur le terrain par comparaison. Nous n'observons aucun écart entre chaque appareil. Il est donc préférable d'avoir des capteurs avec une résolution moindre mais qui sont comparables les uns avec les autres. De plus, ce type de capteur (initialement prévu pour les réfrigérateurs industriels) présente l'avantage d'avoir une sonde thermistance déportée ce qui permet de l'installer dans un abri antiradiation (modèle RS3 normé selon la Royal Meteorology).

Concernant les stations météorologiques complètes, deux types sont utilisés : en milieu urbain, où les problèmes de dégradation et d'autorisation d'installation sont nombreux, nous avons optés pour des stations à moindre coût tout en surveillant régulièrement la qualité et l'étalonnage des capteurs. Il s'agit des stations *Vantage Monitor 2*. En milieu agricole (vignobles, cultures fruitières, ...), nous utilisons des stations *Campbell BWS200* avec un système de liaison GSM (Global System for Mobile communication) afin de récupérer les données quotidiennement. Ces stations sont également utilisées pour les « alertes » aux maladies de la vigne.

Aux échelles fines, le choix des postes de mesures est essentiel. En effet, l'objectif étant d'analyser la variabilité climatique engendrée par des effets locaux, l'emplacement des capteurs n'est pas choisi au hasard et, dans la mesure du possible, un maximum de précaution doit être pris au niveau de l'installation. Par conséquent, les capteurs doivent d'une part être disposés suivant les composantes du milieu susceptibles d'influencer les variables climatiques et d'autre part être le mieux répartis possible sur le terrain d'étude afin de ne pas avoir de secteurs sans prises de mesures ce qui pourrait être un problème au niveau de l'interprétation et de la modélisation des données. Toutefois, dans certaines situations (notamment en milieu urbain), il est extrêmement difficile de disposer les postes de mesures de manière optimale suivant la démarche scientifique mise en place. Cela est dû au nombre très important d'obstacles en milieu urbain mais surtout aux normes imposées par les municipalités. Par exemple, dans le cadre du programme ECORURB (ECologie du Rural vers l'URBain), 20 stations météorologiques ont été installées dans la ville de Rennes et dans sa périphérie. L'objectif était centré sur la compréhension et la prédiction des relations biologiques ville/campagne (influencées par certains facteurs abiotiques comme le climat) (Dubreuil *et al.*, 2008). Certaines

stations n'ont pas pu être placées dans les secteurs choisis initialement. Par exemple, la hauteur des capteurs n'est pas la même pour chaque station ou alors la station disposée dans le parc principal Parc de Rennes (Parc du Thabort) n'a pas pu être placée dans le centre du parc mais à proximité d'un mur. Afin de pallier ce type d'inconvénient, des campagnes de mesures temporaires ont été réalisées afin d'étudier la variabilité spatiale du climat liée à l'implantation des stations.

L'analyse des deux types de données régionales (1) et locales (2) en fonction des échelles spatiales imbriquées permet d'aborder le climat suivant une approche systémique et de mettre en évidence la variabilité spatiotemporelle du climat. Cette méthodologie est appliquée en agroclimatologie ou en climatologie urbaine appliquée où une analyse statistique des données issues des réseaux nationaux n'est pas suffisante.

Cette méthodologie de mesures adaptées aux échelles fines est illustrée dans ma participation à la réalisation d'un « *Atlas agroclimático do entre Douro e Minho* » dans le cadre d'un contrat postdoctoral au laboratoire de géographie physique de la Faculté des Lettres de Porto (Monteiro *et al*, 2003).

1.2.3 Exemple d'un dispositif de mesures agroclimatiques

Ce programme de recherche avait pour objectif de réaliser un atlas climatique à partir d'un réseau de 11 stations météorologiques complètes (température de l'air, humidité relative, direction et vitesse du vent, précipitations) ayant une base de données journalière de 10 ans. Entre des problèmes de qualités des données et d'emplacement des stations de mesures, l'analyse climatique « régionale » a permis de réaliser des cartes assez « grossières » du climat de la région Do Entre Douro e Minho où est produit le *vinho verde*. Mais cette étude n'a pas permis de répondre aux questions principales posées par la profession viticole : quelle est la relation entre le climat et les différents types de cépages cultivés ? Et surtout, pour quelles raisons le cépage Alvarinho, qui est la variété qui permet de faire un *vinho verde* de qualité, ne peut être cultivé que sur quelques hectares (100 000 ceps de vignes) dans un secteur bien défini (frontière nord entre le Portugal et l'Espagne). Le cépage Alvarinho est cultivé dans le vignoble de Monção (figure 3b). Ce cépage est caractérisé par des vins de très bonne qualité mais exige des conditions pédo-climatiques spécifiques. Précoce au débourrement et à la maturation, cette variété est très sensible aux forts refroidissements printaniers et aux amplitudes thermiques diurnes trop importantes. De nombreux essais de plantation de ce cépage ont été effectués dans d'autres vignobles de la région mais cette variété n'a pas réussi à s'adapter (Garido, 1984).

Un protocole de mesures météorologiques et agronomiques adapté aux échelles fines a été mis en place dans les vignobles de Monção et d'Arcos de Valdevez. Ces vignobles sont très proches (moins de 30 km) et réputés pour la qualité des vins mais dont les différences de cépages et des types de vin (taux d'alcool, couleur) laissent entrevoir des conditions climatiques locales spécifiques (Reis, 2002). Par exemple, dans

le vignoble d'Arcoz de Valdevez, les essais de plantation d'Alvarinho se sont toujours soldés par un échec.

Sur les deux sites expérimentaux, des capteurs de températures de type *Tinytag* ont été installés dans les deux vignobles suivant les caractéristiques locales (ex pente, exposition, distance à la rivière...) (figure 3b et c ; tableau 1). Les températures ont été enregistrées en continu de février à octobre (du début de la reprise de végétation jusqu'aux vendanges) 2003 et 2004. Des mesures itinérantes d'écoulements d'air de surface ont été réalisées en situation de gelées nocturnes afin d'estimer les secteurs où l'air froid s'écoule le long des pentes ou stagne dans les replats. En parallèle, les données des deux stations du réseau régional (Arcos de Valdevez et Monção) ont été analysées.

Les résultats ont montré **une forte variabilité spatiale des températures sur des espaces relativement restreints : entre les deux sites expérimentaux (distants de quelques kilomètres) et à l'intérieur même des sites (quelques mètres).**

Le microclimat sur le site d'Arcos-de-Valdevez se définit par une forte variabilité spatiale des températures engendrée par la topographie. Par exemple, les températures nocturnes en situation radiative (ciel clair, vent inférieur à 2 m/s) sont plus faibles sur les terrasses ou dans les secteurs où l'air froid véhiculé par les écoulements gravitaires a tendance à s'accumuler. Par conséquent, au printemps, les vignes situées sur les coteaux enregistrent des températures nocturnes relativement élevées. Ces conditions ont entraîné la plantation de cépages sensibles aux gelées printanières tels que le Loureiro (cultivé sur les coteaux de ce terroir). Toutefois, lors des épisodes gélifs de mi-février, les températures négatives sur les coteaux ont atteint des valeurs pouvant provoquer des dommages pour la vigne après le débourrement (-4°C la nuit du 15 au 16 février 2003 ; -3,5°C la nuit du 16 au 17 février 2003). Si ces épisodes gélifs s'étaient produits au début du mois de mars (débourrement du Loureiro), la probabilité que ce cépage subisse des dommages aurait été très grande. Sur les terrasses, les températures diurnes et nocturnes sont beaucoup plus basses avec notamment de très faibles valeurs relevées lors de nuits gélives pouvant entraîner la destruction des bourgeons. Mais, dans les secteurs les plus froids, le cépage cultivé est le Vinhão. Cette variété à débourrement tardif est peu sensible au gel printanier, cependant si un fort refroidissement nocturne se produit à la mi-avril, les dégâts peuvent également être importants pour cette variété. Au cours de la nuit du 11 au 12 avril 1998, une forte gelée a engendré d'importants dégâts dans les vignobles de *vinho verde* (Madureira *et al.*, 2002). A Arcos-de-Valdevez, les dommages ont été observés sur la terrasse proche de la vallée du Lima au niveau des points 8 et 9. Il ne s'agit pas du secteur le plus froid (action modératrice de la rivière) mais des parcelles où le niveau de croissance de la vigne était le plus avancé.

températures minimales printanières assez élevées. **Ces conditions climatiques sont donc favorables au cépage Alvarinho qui est sensible au gel.** Ce microclimat, très localisé, explique (en partie) la faible surface où ce cépage est cultivé (quelques exploitations dans la région de Monção) (Quénol *et al.*, 2004 et 2007 ; Maciel *et al.*, 2007).

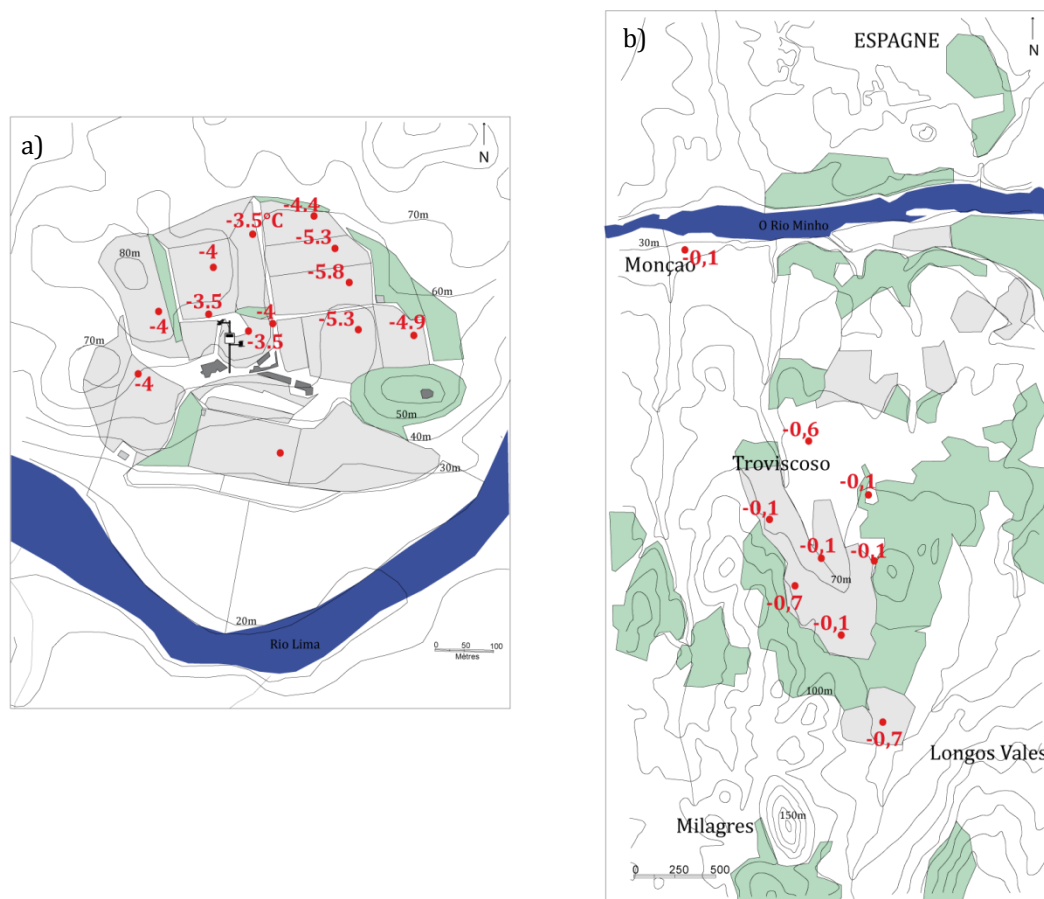


Figure 4 : Températures minimales de la nuit du 15 au 16 février 2003 à Arcos de Valdevez (a) et à Monção (b). (Quénol *et al.*, 2007)

Cette forte variabilité spatiale des températures minimales entre les deux sites liée principalement à la topographie s'observe également sur les températures maximales. A Monção, la topographie accidentée favorise la formation d'écoulements anabatiques qui, en brassant l'air ambiant, limite le réchauffement diurne. A Arcos-de-Valdevez où l'intensité des pentes est moins forte, les températures maximales sont nettement plus élevées qu'à Monção.

L'amplitude thermique diurne, beaucoup moins forte à Monção, et l'absence de gelées de printemps font que les conditions climatiques locales sont très favorable à la culture de l'Alvarinho. L'analyse des données du réseau « régional » n'a pas permis de mettre en évidence ces particularités climatiques locales. **Seule une expérimentation climatique adaptée aux échelles fines permet de caractériser cette forte variabilité climatique sur des espaces restreints.**

L'intérêt des mesures météorologiques aux échelles fines est multiple : d'une part, l'acquisition de données simultanément sur divers points de l'espace permettra de réaliser un état des lieux de la climatologie locale et d'en déduire les secteurs à risques (économique ou sanitaire). D'autre part, l'enregistrement en continu des variables météorologiques ouvrira des perspectives sur la gestion des aléas et des risques liés au climat mais également d'aborder la question de l'adaptation au changement climatique.

1.3 Validation des observations climatiques

Les expérimentations climatiques effectuées en fonction des échelles spatiales imbriquées permettent d'analyser la répartition des variables climatiques sur de petits espaces. Ces données ont de multiples applications dans les domaines de l'agriculture, de la biodiversité, de la santé, ... Cette variabilité spatiale des paramètres atmosphériques influencée par les facteurs locaux doit être validée par l'intermédiaire de données de « réponse » afin d'évaluer, par l'exemple, l'hétérogénéité du risque lorsqu'il s'agit d'un aléa climatique.

Pour les études agroclimatiques en viticulture, la variabilité spatiale des paramètres atmosphériques à l'échelle d'un vignoble doit être validée par l'intermédiaire des données de réponse viticoles et/ou œnologiques afin d'évaluer l'hétérogénéité de la qualité du raisin et du vin influencée par les facteurs locaux. La caractérisation de la réponse vitivinicole porte sur la croissance de la plante en fonction de la période de son cycle végétatif (par l'intermédiaire du suivi des stades phénologiques et de la date de récolte) et sur la qualité du raisin en analysant les teneurs en sucres et acides organiques, l'acidité totale, ainsi que la teneur en anthocyanes pour les raisins rouges (Barbeau 2004 ; Morlat, 2010). En cas de phénomènes météorologiques extrêmes comme des gelées de printemps ou des périodes de sécheresse, les conséquences sur les végétaux sont analysées (ex : bourgeons gelés ou stress hydrique de la vigne).

Par exemple, pour l'étude agroclimatique dans les vignobles de *vinho verde*, un suivi de la phénologie de la vigne et de la qualité du raisin a été effectué durant toute la période de croissance de la vigne (de mars à octobre). Les résultats ont montré, dans les vignobles d'Arcos-de-Valdevez, une très forte variabilité temporelle au niveau de la phénologie de la vigne où l'on peut noter un décalage de plusieurs semaines entre les points les plus froids (ex : terrasses ou fond de vallée) et les pentes bien exposées aux radiations solaires. Par exemple, le 1^{er} avril 2003, période où certains capteurs enregistrent encore des températures nocturnes négatives, la vigne au niveau du point n°4 (terrasse) est encore au stade C (début du débourrement) alors que sur le point 10 (forte pente exposée Est), elle est au stade F (grappes visibles) (figure 4) (Baggiolini, 1952) sachant que plus le stade de croissance est développé plus la sensibilité aux basses températures est grande (Cellier, 1989). Cela n'a pas eu d'impact au niveau du risque gélif car les cépages les moins sensibles, qui sont également les moins précoces, sont plantés dans les zones les plus froides. On peut noter ici une forme d'adaptation du viticulteur à la variabilité spatiale de la température.

La validation des données climatiques par le suivi de la végétation ne se fait pas uniquement dans des études d'agro-climatologie. En climatologie urbaine, la variabilité climatique intra- et interurbaine liée principalement à l'Ilot de Chaleur Urbain (ICU) peut avoir des conséquences sur la qualité de vie, la santé ou sur la biodiversité. Dans le programme pluridisciplinaire ECORURB, parallèlement à une expérimentation climatique, un protocole d'analyse phénologique a été mis en place afin d'observer l'impact de la variabilité climatique sur la végétation dans l'agglomération rennaise.

Depuis 2003, le programme pluridisciplinaire ECORURB a pour objectif de comprendre les effets de l'urbanisation sur la biodiversité locale et de prévenir les risques biologiques à Rennes (Ille-et-Vilaine). Parmi les modifications environnementales générées par l'accroissement urbain et qui sont susceptibles d'affecter la dynamique des espèces végétales, le climat apparaît comme une des variables clé à étudier. Le cœur du projet, d'un point de vue écologique et biologique porte sur l'étude des dynamiques des espèces à l'interface rural-urbain et notamment sur la cartographie des climats locaux au moyen d'un réseau de mesure et de la phénologie d'espèces indicatives (Mimet *et al.*, 2005 ; Mimet *et al.*, 2009 ; Quénot *et al.*, 2010).

Ce dispositif expérimental a pour objectif d'étudier le rôle direct du climat urbain sur la phénologie printanière par la mise en relation directe entre les données phénologiques et les données climatiques des sites. Il est complété par un protocole expérimental novateur visant à éliminer le biais causé par la variabilité phénologique intra-spécifique. Des branches de cerisier ont été prélevées sur un même individu et à la même hauteur. Les rameaux ont été installés dans des sachets d'eau (avec eau de javel diluée au 1/1000^{ème} pour limiter la prolifération des microorganismes). Ces sacs ont été orientés au sud et placés contre un mur ou une haie à 1,5 m de hauteur, pour se trouver dans les mêmes conditions d'ensoleillement. Ces conditions ont été respectées sur l'ensemble des sites. Les suivis phénologiques ont été réalisés en déterminant les stades de développement des bourgeons. Le dispositif est mis en place à proximité (1 à 2 m) de six stations météorologiques réparties sur un gradient d'urbanisation nord-est/sud-ouest s'étendant du centre-ville à la zone périurbaine. Chaque station est caractérisée par son appartenance à l'une des trois zones d'urbanisation : urbain (U), suburbain (SU) et périurbain (PU) ; ainsi que par les conditions de végétalisation de la station : végétalisée (v) ou non-végétalisée (pas de marqueur) (figure 5).

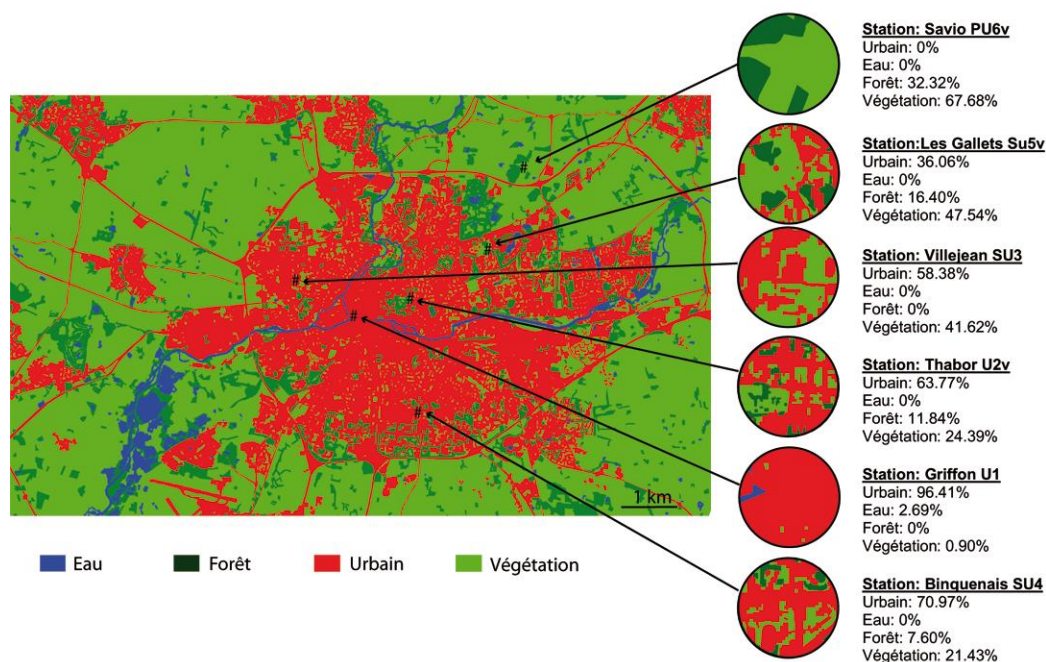


Figure 5 : Occupation du sol dans un rayon de 200m autour de 6 stations météorologiques de la métropole rennaise (Quénol et al., 2010).

Les données issues du réseau météorologique ont montré une forte variabilité spatio-temporelle du climat à l'échelle ville/campagne mais également à l'échelle intra-urbaine. Ainsi, d'importantes variations climatiques sont observées entre les stations urbaines, suburbaines et périurbaines. Outre la distance au centre-ville (où le bâti dense engendre une augmentation diurne et nocturne des températures), la nature de l'occupation du sol a un impact important sur le climat local. Ainsi, le climat observé dans une zone dégagée et végétalisée suburbaine peut être très proche de celui relevé dans une zone périurbaine (Quénol et al., 2010).

Les résultats phénologiques ont confirmé les travaux déjà réalisés dans des villes européennes (Roetzer et al., 2000) et chinoises (Luo et al., 2007). La première constatation a été un déclenchement plus précoce de la floraison en ville. Les écarts thermiques enregistrés entre chaque station météorologique ont montré une concordance avec les observations phénologiques : les différences de température (notamment températures minimales) entre les secteurs urbains, suburbains et périurbains sont plus importantes au cours des premières observations notamment au moment du débourrement. C'est à cette période que les écarts phénologiques ont été les plus forts (figure 6).

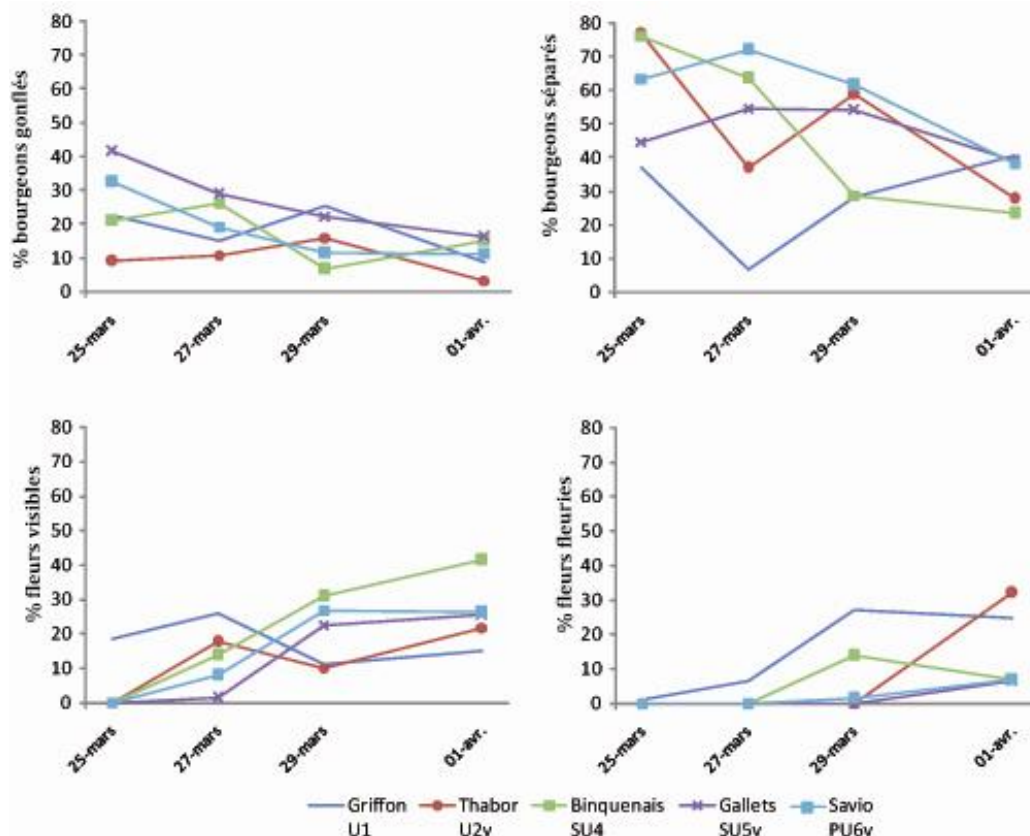


Figure 6 : Evolution de la phénologie du cerisier en fonction de l'occupation du sol dans la métropole rennaise entre le 1^{er} mars et le 1^{er} avril 2005.

1.4 Spatialisation et modélisation adaptées aux échelles fines

Dans une démarche similaire à l'acquisition des données, les techniques de modélisation spatiale doivent prendre en compte l'influence de ces paramètres locaux sachant qu'ils agissent sur les variables météorologiques à différentes échelles spatiales imbriquées. Il convient donc d'utiliser des méthodes permettant d'établir les relations entre les caractéristiques de surface (topographie, occupation du sol) et les variables météorologiques.

1.4.1 Modélisation géostatistique

Les méthodes statistiques constituent des outils essentiels pour résumer un grand nombre de données à traiter, pour identifier d'éventuelles structures ou récurrences dans le temps et dans l'espace, en somme pour dégager l'information contenue dans les bases de données. Outre leur apport dans l'étude de la variabilité d'un phénomène, les méthodes statistiques permettent également de tester des hypothèses sur les relations entre plusieurs phénomènes (Madelin, 2004). Les méthodes statistiques utilisées couramment pour l'interpolation des données météorologiques issues des réseaux climatologiques classiques sont inadaptées aux échelles fines. Il convient donc d'utiliser des méthodes permettant d'établir les relations entre les caractéristiques de surface

(morphologie, occupation du sol) et les variables météorologiques. « *Les méthodes les plus prometteuses de cartographie à échelle fine (...) reposent sur une interpolation supervisée des mesures localisées, utilisant des relations statistiques (généralement des régression multiples) entre les paramètres climatologiques mesurés et des descripteurs quantifiés* » de l'état de la surface (Kergomard, 2002). Spatialiser un élément météorologique ou climatique revient à déterminer, à partir des valeurs mesurées de ce paramètre pour quelques postes météorologiques irrégulièrement répartis, sa valeur en tout point non instrumenté de l'espace (Merlier, 2001).

Comme l'indique Madelin (2004), les méthodes statistiques constituent des outils essentiels pour résumer un grand nombre de données à traiter, pour identifier d'éventuelles structures ou récurrences dans le temps et dans l'espace, en somme pour dégager l'information contenue dans les bases de données. Outre leur apport dans l'étude de la variabilité d'un phénomène, les méthodes statistiques permettent également de tester des hypothèses sur les relations entre plusieurs phénomènes. Dans ce type d'étude, l'existence d'un lien entre les éléments climatiques et différents facteurs (topographie, occupation du sol, ...) est testée. Afin de spatialiser les données ponctuelles des mesures sur le terrain, nous cherchons donc à déterminer quels sont les facteurs géographiques, environnementaux et topographiques influençant de manière significative la distribution spatiale des mesures observées. Ainsi, dans une démarche hypothético-déductive, il s'agit de quantifier leur rôle en testant et en mesurant les effets respectifs de chaque facteur sur les paramètres météorologiques et de construire *in fine* des modèles statistiques à partir de régressions multiples. L'équation de cette régression est alors utilisée pour spatialiser, par l'intermédiaire d'un Système d'Information Géographique (SIG), le phénomène en tout point de l'espace (en fonction des paramètres locaux) (figure 7).

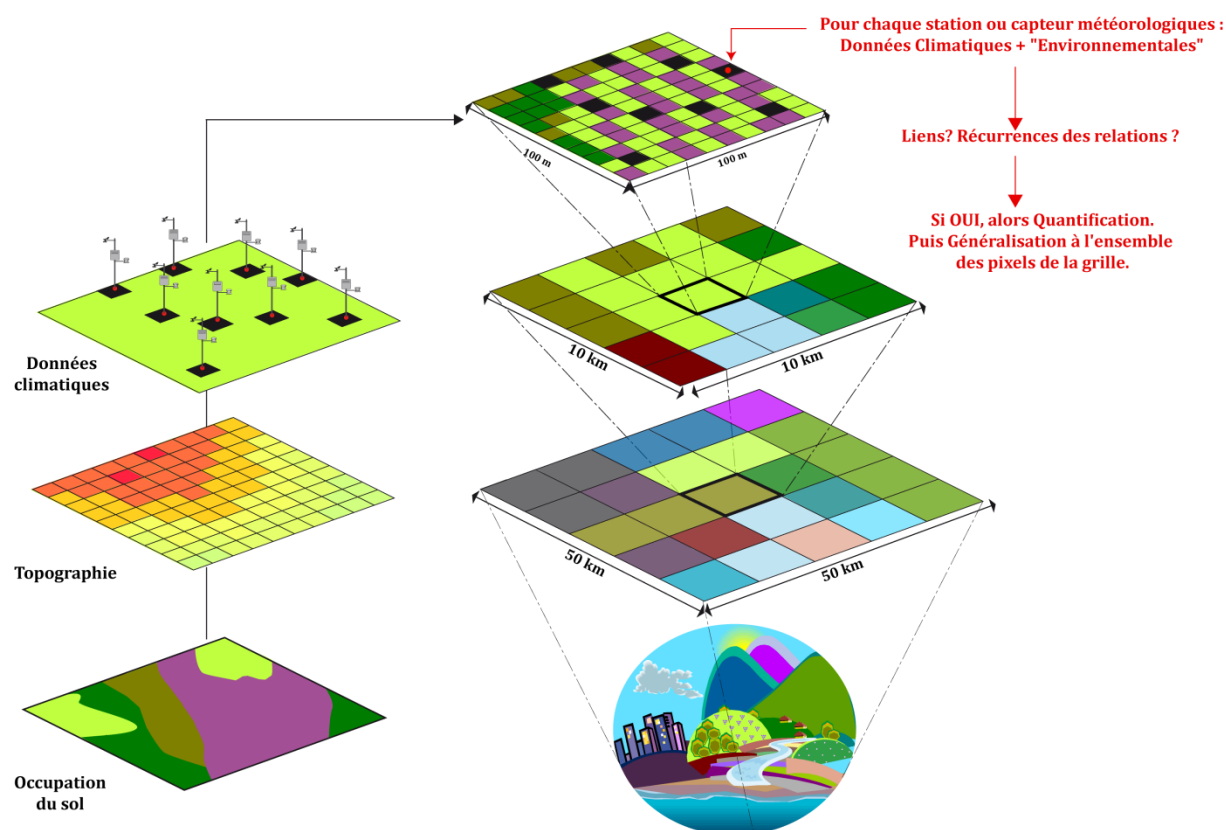


Figure 7 : Principes de la modélisation statistique multicritères appliquée aux échelles fines (Madelin et Quénol, 2012)

Avec l'amélioration des fonctionnalités des SIG et l'augmentation des capacités de calcul des ordinateurs, la spatialisation avec les méthodes statistiques multicritères a été utilisée dans de nombreuses études de la climatologie appliquée (Laughlin et Kalma, 1987 ; Blennow et Persson, 1998 ; Bradley *et al.*, 2002 ; Chapman et Thornes, 2006 ; Stahl *et al.*, 2006 ; Joly, 2007).

L'application de cette démarche de spatialisation du climat aux échelles fines par méthodes statistiques et SIG nécessite entre autre des données de bases possédant une résolution fine (ex : modèles numériques de terrains, occupation du sol, météorologiques, ...).

1.4.2 Modélisation numérique à méso-échelles

L'explication apportée par le modèle de la régression multiple, centré sur les facteurs géographiques et environnementaux reste partielle. D'autres facteurs tels que la circulation atmosphérique peuvent être également intégrés en modélisation grâce à l'utilisation de modèles atmosphériques méso-échelle tels que, pour n'en citer quelques uns parmi les plus connus, les modèles ALADIN (*Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational*, <http://www.cnrm-game.fr>), RAMS (Regional Atmospheric

Modeling System) (www.atmet.com), MM5 : la cinquième génération du Penn State / modèle NCAR (www.mmm.ucar.edu/mm5) ou WRF (Weather Research and Forecasting) (<http://wrf-model.org/index.php>). Ces modèles atmosphériques dits physiques permettent d'appréhender la complexité du milieu (transferts Sol/Atmosphère), difficilement prise en compte par le type de modélisation précédent (géostatistique). Ces modèles sont utilisés notamment dans la prévision / prédiction météorologique (Cox *et al.*, 1998 ; Case *et al.*, 2002 ; Kain *et al.*, 2006 ; Pattanayak *et al.*, 2008), de la qualité de l'air (Pielke *et al.*, 1991 ; Uliasz *et al.*, 1996 ; Mavrakis *et al.*, 2010) ou encore dans la prévision climatique régionale (Avisar et Mahrer, 1988 ; Heinemann et Martsolf, 1988, Kondo et Okusa, 1990 ; Miller *et al.*, 2003 ; Done *et al.*, 2004 ; Gandu *et al.*, 2004 ; Narapusetty et Mölders, 2005). Les références citées ci-dessus (liste non exhaustive) montrent que ces modèles sont utilisés depuis plusieurs décennies dans plusieurs pays à des fins différentes et surtout qu'ils évoluent rapidement grâce à l'augmentation de la puissance des calculateurs qui permet l'amélioration aussi bien de leur résolution que de leur complexité.

Par exemple, le modèle méso-échelle RAMS (Regional Atmospheric Modeling System), à l'origine développé par l'Université du Colorado (Pielke *et al.*, 1992), est un modèle parallélisé qui permet la simulation ou la prévision de circulations atmosphériques dont l'échelle spatiale s'étend de moins de 1 km au millier de km (www.atmet.com). C'est un modèle non-hydrostatique qui prend donc en compte les hétérogénéités de surface : topographie (USGS 1 km ou SRTM 90 m), texture du sol (FAO 1km), occupation du sol (USGS 1km basé sur des images AVHRR), NDVI (USGS 1km) et température de surface de la mer (NOAA 100 km) ainsi que les processus de convection et de condensation (microphysique).

La circulation générale et la dynamique d'échelle locale sont intégrées au moyen de grilles imbriquées. RAMS intègre, entre autre :

(1) Une analyse objective sur des niveaux isentropiques qui permet l'initialisation du modèle à partir de données météorologiques telles que les analyses du centre européen du Reading European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ou les analyses du National Center for Environmental Prediction - National Center for Atmospheric Research (NCEP-NCAR) (Kalnay *et al.*, 1996), l'assimilation des radiosondages locaux et les paramètres atmosphériques relevés par les stations météorologiques au sol.

(2) Un modèle sol et végétation décrivant les interactions sol-végétation-atmosphère (LEAF2). Un examen du rôle des conditions de surface de la terre dans les modèles atmosphériques, y compris la version 2 du Land Ecosystem-Atmosphere Feedback (LEAF-2) dans RAMS est décrit dans Chen *et al.*, (2001).

RAMS est construit autour d'un ensemble complet d'équations qui décrivent la dynamique et la thermodynamique de l'atmosphère ainsi que les quantités de vapeur d'eau et du rapport de mélange d'hydrométéores liquides et de glace. Ces équations sont complétées par un large choix de paramétrisations pour la diffusion turbulente ; le

rayonnement solaire et terrestre; les processus d'humidité, y compris la formation et l'interaction des nuages et de précipitation hydrométéores liquides et de la glace ; les effets cinématiques de terrain ; la convection de cumulus ; les échanges de chaleur latente et sensible entre l'atmosphère et la surface, consistant en plusieurs couches de sol, végétation, couverture neigeuse, eau de la canopée et eau de surface. Un examen du rôle des conditions de surface de la terre dans les modèles atmosphériques, y compris la version 2 du Land Ecosystem–Atmosphere Feedback (LEAF-2) dans RAMS est décrit dans Chen *et al.*, (2001).

RAMS a été utilisé dans plusieurs études pour démontrer le rôle de la variabilité du relief/paysage dans la génération locale de circulations de masses d'air (ex : Helmis *et al.*, 1987 ; McQueen *et al.*, 1995).

Le transfert d'échelles est assuré par un système de grilles imbriquées sur des domaines de résolutions différentes communiquant l'information entre elles selon les algorithmes de Clark décrits dans Clark et Farley (1984) et Walko *et al.*, (1995).

Les données climatiques provenant des réseaux de stations automatiques sur les domaines étudiés permettent de confronter les résultats des simulations aux données d'observation (validation) (figure 8).

« *L'intérêt du modèle est qu'il tient compte des propriétés de surface (relief, occupation du sol) tout en adaptant la description à la maille de la simulation* » (Bonnefoy *et al.*, 2009). La résolution adaptée aux échelles fines dépend de la qualité des données d'entrée (ex : modèle sol/végétation, ...) et de la capacité en temps de calcul. De nombreuses modélisations climatiques régionales ont été réalisées et ont montré les capacités de ces modèles à reproduire la variabilité climatique à des résolutions d'une dizaine de kilomètres (Klemp *et al.*, 2006). Mais ces dernières années, avec le développement des modèles régionaux dans le cadre d'études climatiques appliquées notamment en relation avec le changement climatique, avec l'amélioration de la résolution de l'état de surface (sol, végétation et topographie) grâce notamment à la télédétection haute résolution et avec l'augmentation de la capacité de calcul des ordinateurs, ces modèles sont utilisés de plus en plus à des échelles spatiales plus fines. Bonnardot et Cautenet (2009) ont utilisé RAMS pour réaliser une modélisation climatique dans le vignoble de la Province occidentale du Cap en Afrique du Sud. Des simulations à 200 m de résolution ont montré l'intérêt et l'apport de cette grille à haute résolution pour modéliser l'impact de la circulation atmosphérique locale sur la région viticole (figure 8).

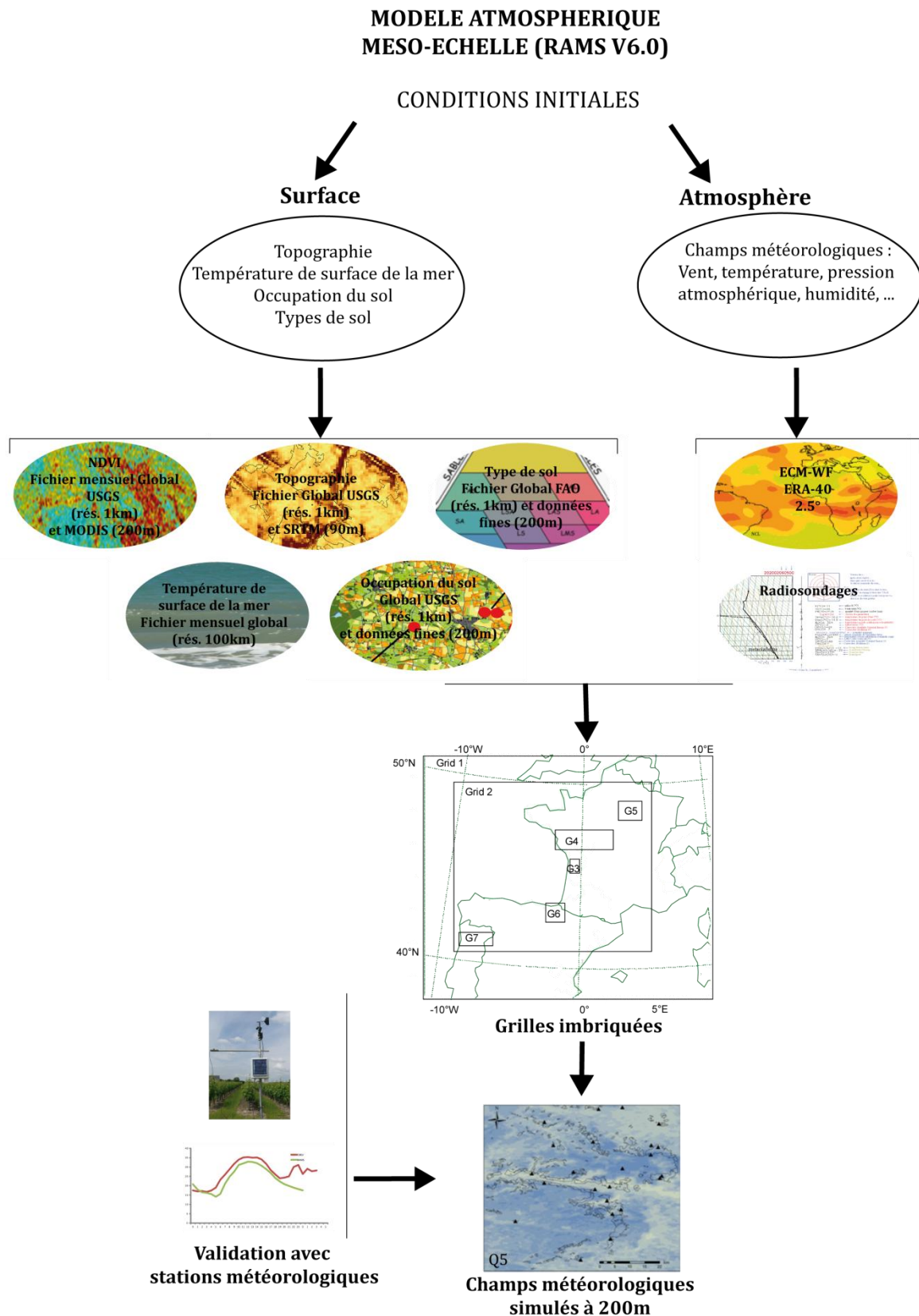


Figure 8 : Principes théoriques de la modélisation numérique méso-échelle appliquée à l'échelle des terroirs viticoles.

2. Observation et modélisation spatiale du climat à l'échelle des terroirs viticoles

L'évolution actuelle et future du climat global engendre de nombreuses interrogations sur le fonctionnement des géosystèmes aux échelles locales. Un changement global du climat aura obligatoirement des répercussions sur le climat local pouvant engendrer un risque pour les individus et leurs activités (inondation, brouillard, gelée ...). C'est le cas de la viticulture où la qualité du vin, le choix des cépages ou encore la spécificité des terroirs dépendent de caractéristiques locales (topographie, type de sol, ...) qui vont agir sur le climat. Un changement global du climat aura obligatoirement des répercussions sur le climat local, sur les caractéristiques du vin et donc des conséquences au niveau économique. Dans ce contexte, les impacts attendus d'un éventuel changement climatique posent un certain nombre de questions, ne serait-ce que pour améliorer l'adaptation.

Dans un contexte d'intensification des concurrences entre les pays producteurs de vins, les viticulteurs des pays traditionnels se défendent en mettant en valeur la spécificité des terroirs définis en partie par les climats locaux. La notion de terroir est, pour le viticulteur, un outil de commercialisation car il permet d'apporter une spécificité et une identité au vin. Les professionnels viticoles sont alors demandeurs d'outils et de techniques scientifiques pour évaluer les potentialités agroclimatiques actuelles et futures, notamment à travers une meilleure connaissance des variations locales du climat afin d'adapter suffisamment tôt leurs pratiques culturelles. L'évaluation du changement climatique adapté à l'échelle du terroir (échelles fines) est donc primordiale dans l'optique de la mise en place d'une politique raisonnée d'adaptation aux modifications du climat.

Les approches de ces phénomènes à partir des modèles de circulation générale (MCG) ne sont pas adaptées aux échelles fines et, de ce fait, apportent des résultats trop approximatifs. Même si de réels progrès ont été réalisés ces dernières années au niveau de la modélisation climatique régionale, aucun modèle utilisé dans un cadre opérationnel ne permet de faire une simulation du climat aux échelles locales alors que très souvent des appellations viticoles concernent des secteurs de quelques kilomètres carrés. Par exemple, l'appellation « *Quart de Chaumes* » dans les Coteaux du Layon s'étend sur un secteur d'environ 2km sur 3km. Cette appellation est définie par des caractéristiques de sol, d'exposition (principalement sud), environnementales (proximité de la rivière Le Layon) et de cépage (Chenin) spécifiques. C'est la combinaison de ces caractéristiques (plus le travail du vigneron) qui permet d'élaborer ce vin liquoreux avec sa spécificité reconnue. C'est donc à une échelle spatiale plus fine, en tenant compte des caractéristiques de surface et des capacités matérielles des viticulteurs, qu'il sera possible d'évaluer les conséquences imputables au changement climatique. Une estimation des conséquences du changement climatique à une échelle fine permettrait de mieux orienter les possibles conséquences économiques et sociales de changement.

Les programmes ANR-JC TERVICLIM (2008-2012) et GICC-TERADCLIM (2011-2013) ont pour objectif de mettre en place une méthodologie de mesures (météorologiques et agronomiques) et de modélisation spatiale du climat adaptée aux échelles fines afin de définir le climat actuel des terroirs viticoles et d'apporter des réponses aux conséquences futures du changement climatique en procédant à une simulation adaptée.

Notre démarche scientifique vise à mettre en place une méthodologie reposant sur des observations climatiques et agronomiques *in situ* et sur de la modélisation spatiale du climat, permettant d'évaluer la variabilité spatiale des paramètres atmosphériques à l'échelle d'un terroir (valeurs moyennes et extrêmes climatiques). Confrontée à des observations agronomiques (stress hydrique, phénologie, taux de sucre, taux d'alcool, ...), l'étude météorologique permet de déterminer le climat spécifique d'un terroir. En comblant le manque de données aux échelles fines, ce travail permet d'affiner les connaissances sur les modifications climatiques qui pourront apparaître dans les terroirs viticoles et donc d'améliorer les estimations sur les possibles impacts économiques. Cette méthodologie est développée et appliquée à plusieurs vignobles de renommée internationale, vignobles pour lesquels les caractéristiques climatiques jouent un rôle important sur la qualité du vin et où des expérimentations scientifiques sont menées (par les partenaires du projet TERVICLIM) depuis plusieurs années notamment dans le cadre de ces 2 programmes de recherches. La complémentarité des sites expérimentaux (terroirs français, européens et étrangers du « nouveau monde ») permet d'étudier les potentialités agro-climatiques locales des terroirs dans des conditions macro-climatiques différentes.

Ce type de démarche, sur la compréhension du fonctionnement du système climatique aux échelles fines avec la mise en place de méthodes de mesures (météorologiques et agronomiques) ou des techniques de modélisation spatiale, fait inévitablement appel au savoir-faire d'autres disciplines. Cette équipe interdisciplinaire composée de géographes, d'agronomes, de physiciens de l'atmosphère et de professionnels viticoles (ingénieurs, viticulteurs, ...) a été mise en place de manière à mettre en relation différentes compétences nécessaires pour répondre à cette problématique. Ces programmes de recherche sont conduits en collaboration avec l'industrie viticole pour répondre aux besoins du monde vitivinicole et améliorer la connaissance des relations plante/environnement afin d'assurer la production de vins de terroirs de qualité, uniques et compétitifs sur le marché international.

2.1 Les terroirs viticoles et le changement climatique

2.1.1 Les terroirs viticoles

Selon les disciplines et les pays viticoles, la notion de « terroir viticole » varie ce qui explique les difficultés qu'a eu l'Organisation Internationale de la Vigne et du Vin (OIV) à proposer une définition commune à tous les pays membres. *« Le terroir vitivinicole est un concept qui se réfère à un espace sur lequel se développe un savoir collectif des interactions entre un milieu physique et biologique identifiable et les pratiques vitivinicoles appliquées, qui confèrent des caractéristiques distinctives aux produits originaires de cet*

espace » (Résolution OIV/Viti 333/2010). En 1984, l'Institut National des Appellations d'Origine (INAO) avait défini le terroir comme « *un ensemble de terrains qui par la nature plus ou moins variée de leur sol (caractères agronomiques et géopédologiques), leur situation et leur environnement (topographie, exposition, ... influant sur le climat) se sont révélés par l'expérience et les usages propices à la production des vins fins* ». Dans une même unité de terroir, les facteurs susceptibles d'agir sur la qualité du raisin et de caractériser ce terroir, sont les composantes « *climat et sol* », qui sont en interaction avec la plante et les technologies de production (Vaudour, 2003). Les spécificités des terroirs viticoles sont donc liées à des caractéristiques locales dont le climat est un élément essentiel. D'ailleurs, en Bourgogne, on utilise le terme « *climat* » pour désigner un terroir remarquable dont l'extension géographique est particulièrement réduite (Vaudour, 2003).

Le point commun entre ces différentes définitions est l'interaction Homme/Milieu. Il apparaît donc nécessaire d'employer une approche systémique pour étudier et caractériser un terroir viticole. Le changement climatique va inévitablement apporter des modifications à l'identité des terroirs. Pour permettre à la profession viticole de s'adapter suffisamment tôt à cette nouvelle donne climatique et de limiter l'impact économique du changement climatique, il est nécessaire d'employer une méthodologie adaptée au fonctionnement de l'agro-système viticole qui détermine le terroir : c'est-à-dire d'étudier le climat à l'échelle du terroir en fonction des différents facteurs environnementaux (sol, climat local, ...) et humains (choix et pratiques culturaux) qui le caractérise et en fonction de leurs interactions.

Le « terroir viticole » est « l'objet d'étude » idéal pour analyser la variabilité spatiotemporelle du climat aux échelles locales dans le contexte du changement climatique ; d'une part, parce que la vigne est un très bon « marqueur » du changement climatique avec l'analyse de la phénologie et des dates de vendanges sur de longues séries temporelles (Le Roy Ladurie, 2009) et d'autre part, parce que les caractéristiques et la qualité des vins sont fortement influencés par les conditions locales (climat, topographie, sol, ...). La figure 9 représente l'interrelation entre les principaux facteurs qui caractérisent la forte variabilité spatiotemporelle du climat et les caractéristiques du vin à l'échelle d'un terroir viticole.

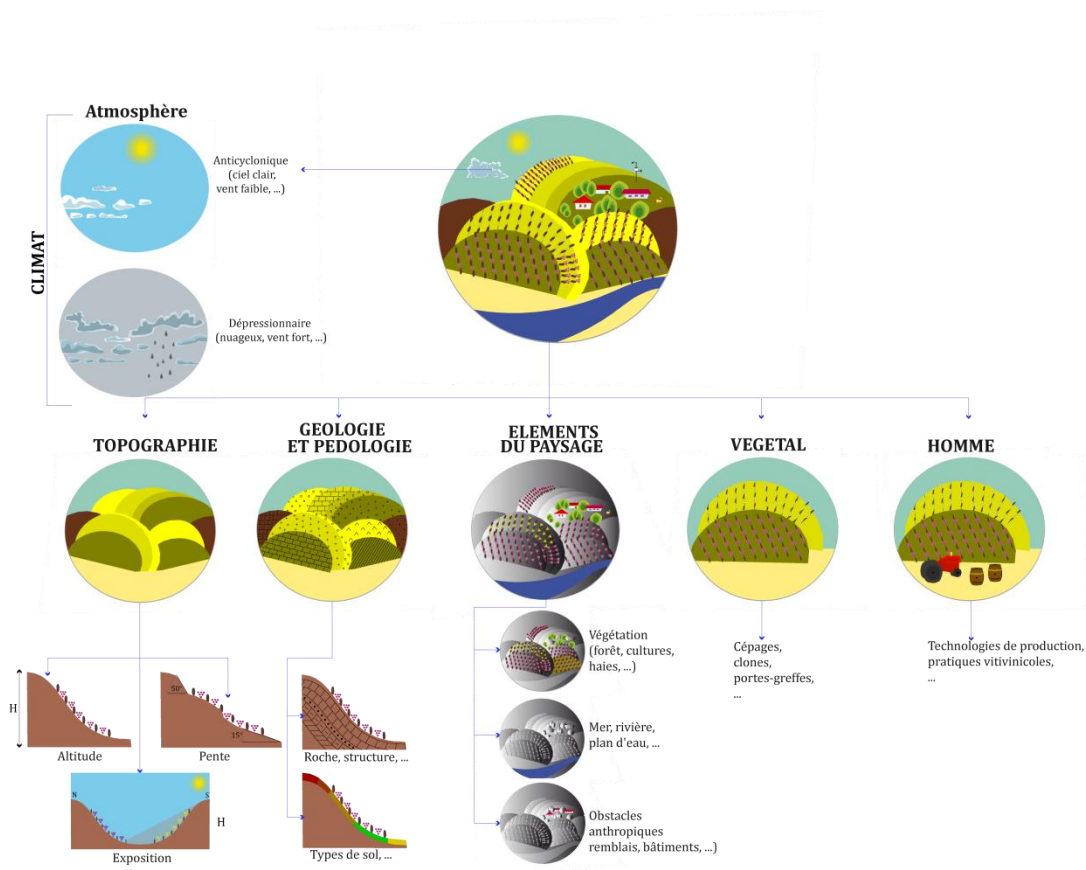


Figure 9 : Principaux facteurs caractérisant les terroirs viticoles.

2.1.2 Relation vigne/climat : un bon indicateur du changement climatique

Comme l'indique Seguin (2004), on peut se référer aux travaux de Rozenzweig et Hillel (1998), de Reddy et Hodges (2000), de Soussana (2001) ou encore aux rapports du GIEC (2001 et 2007) pour avoir un premier diagnostic des conséquences du changement climatique sur les productions agricoles à l'échelle mondiale. Comme indiqué dans le chapitre précédent, la vigne est un bon indicateur de l'évolution du climat du passé et du présent. Chuine *et al.*, (2004) ont montré la relation entre les dates de vendanges et les grandes périodes climatiques avec notamment une avancée moyenne des dates de vendanges de plusieurs semaines ces cinquante dernières années. « En moyenne, sur la Côte de Beaune, les vendanges avaient lieu fin septembre au cours des années 1960-1970 ; elles ont été avancées à la mi-septembre dans les années 1990-2000 » (Chabin *et al.*, 2004). Ganichot (2002) a également mis en évidence cette précocité des dates de vendange de presque un mois en cinquante ans dans la région de Châteauneuf-du-Pape.

Les différents travaux sur la relation entre le cycle de croissance de la vigne et le climat ont permis d'aborder le thème de l'impact du changement climatique sur la viticulture. En 1996, Bonnardot mettait déjà en évidence un raccourcissement de la

période floraison-récolte sur le cépage Pinot noir en Bourgogne associé à une augmentation de la température durant la période de maturation. Depuis la parution d'un article sur l'effet de l'augmentation du gaz carbonique sur la photosynthèse de la vigne (Schlutz, 2000), l'évolution des dates des stades phénologiques en relation avec des indices bioclimatiques a été largement étudiée dans le monde entier (Van Leuwen, 2004 ; Chuine *et al.*, 2004 ; De Cortazar, 2006 et 2007 ; Webb *et al.*, 2007 ; Bellia *et al.*, 2008 ; Hall et Jones, 2009 ; Briche, 2011). Ainsi, les travaux de l'INRA, notamment ceux de Delécolle *et al.* (1999) et de Seguin (2002), portant sur plusieurs zones géographiques françaises ont montré une avance significative dans la date de floraison pour le cépage Chasselas. Ces études ont permis de définir les potentialités agroclimatiques adaptées à une nouvelle donne climatique. Ainsi, Carbonneau (1992), Schultz (2000), Tonietto *et al.* (2004) et Jones (2005) ont évalué l'impact du changement climatique par l'analyse d'indices bioclimatiques (ex : indice héliothermique saisonnier, indice de sécheresse, indice de fraîcheur des nuits, ...), de dates de maturité du raisin, de taux de sucre ou d'avancées phénologiques.

2.1.3 La question de l'adaptation

La précocité des stades phénologiques ainsi que le raccourcissement du cycle de la vigne ont posé un certain nombre de questions sur l'impact du changement climatique sur la viticulture et sur son adaptation (ex : évolution des variétés, adaptation des techniques culturales, ...) que cela soit à court, moyen ou long terme. En Europe de l'Ouest, l'année 2003 a été marquée par des extrêmes climatiques (gelées de printemps et canicule estivale) qui ont eu des conséquences néfastes pour la vigne notamment des dégâts liés au gel en Champagne et d'importants problèmes de stress hydrique et d'échaudage des baies dans les vignobles du sud de l'Europe (Briche, 2011 ; Briche *et al.*, 2011). En Australie, ce sont de longues périodes avec des températures très élevées qui ont engendrées des dommages importants pour l'activité viticole australienne (Webb *et al.* 2007 ; Webb *et al.*, 2008 ; Hall and Jones, 2009 ; Webb *et al.*, 2010). D'après de nombreux scientifiques (notamment les physiciens de l'atmosphère), ces conditions climatiques marquées par des événements extrêmes seront beaucoup plus fréquentes dans le futur et auront obligatoirement un impact sur la viticulture mondiale (André *et al.*, 2004). Ceci pose inévitablement la question de l'adaptation des vignobles au changement climatique.

Les méthodes d'adaptation de la viticulture sont différentes suivant l'intensité des modifications climatiques. Par exemple, en Europe de l'Ouest, à court et à moyen terme, les méthodes d'adaptation concernent principalement des modifications de techniques culturales. Dans les vignobles du Val de Loire, où actuellement l'augmentation moyenne de la température de 1°C sur les 30 dernières années a plutôt des conséquences favorables sur la qualité des vins, Barbeau (2007) préconise à court terme une adaptation des pratiques culturales telles que l'entretien du sol, la date et le type de taille ou des interventions sur le feuillage, etc. A plus long terme, si l'augmentation des

températures moyenne est supérieure à 4-6°C, une évolution de l'encépagement (ou de nouveaux types d'association cépage/porte-greffe), un changement technologique (ex : irrigation qualitative de précision en zone critique) et une adaptation par l'extension de la viticulture à des régions plus septentrionales seront certainement à envisager. « *La géographie viticole s'en trouverait modifiée, admettant une frange supplémentaire de 100 km dans chaque hémisphère vers 2020-2050* » (Vaudour, 2003). Le calcul des indices bioclimatiques en fonction des différents scénarios du Groupe International d'Etude sur le Changement Climatique (GIECC) ont montré d'importantes modifications sur la répartition des vignobles à l'horizon 2070-2100 avec la disparition de certaines zones comme le sud de l'Australie ou des pays méditerranéen et l'avènement de nouveaux terroirs comme en Europe du Nord (Jones, 2007 ; Jones *et al.*, 2007 ; Jones *et al.*, 2009 ; Hall et Jones, 2010).

Les travaux sur les adaptations au changement climatique aboutissent à des simulations d'extension spatiale de la vigne, de changement d'encépagement, ou d'évolution de la teneur en sucre du raisin pour les différentes régions viticoles de la planète (Tonietto et Carbonneau, 2004 ; Jones *et al.*, 2005). En France, Garcia de Cortazar (2007) a « *adapté un modèle générique de cultures, le modèle STICS, à la vigne à l'échelle des grands vignobles de France pour ensuite l'appliquer à une étude d'impact du changement climatique à la même échelle* ». Les résultats ont montré la possibilité de l'implantation du cépage Syrah dans toutes les régions viticoles françaises : ainsi, « *pour le scénario B2, la culture de la Syrah pourrait s'implanter dans les vignobles de Bordeaux et Anjou et dans le cas du scénario A2 l'adaptation pourrait s'étendre aux vignobles de Champagne et de Bourgogne* » (Garcia de Cortazar, 2006).

La vigne est donc extrêmement sensible aux variations climatiques, avec des variétés spécifiques produisant des vins avec une typicité et une qualité qui doivent être maintenues dans une marge étroite (Jones, 2006). L'expérience accumulée durant plusieurs siècles (pour certaines régions viticoles) a eu pour conséquence une répartition des vignobles et des types de cépages qui est considérée optimale pour maintenir la viabilité de la production vitivinicole. Le changement climatique global a et aura un impact important sur les caractéristiques et la qualité des vins, aussi bien que sur le potentiel pour planter différentes variétés de vigne dans des secteurs existants de vignoble (Kenny et Harrison, 1992 ; Schultz, 2000 ; Duchêne et Schneider, 2005 ; Seguin, 2010 ; Madelin *et al.*, 2010 ;). La question de l'adaptation des secteurs de vignoble au changement climatique est très importante parce que la vigne, contrairement aux cultures annuelles, est plantée pour plusieurs dizaines d'années et le choix des variétés adaptées au climat actuel et futur est très important (Howden *et al.*, 2007 ; Battaglini, 2009).

Ces différentes études sur l'impact du changement climatique réalisées abordent les grandes régions viticoles mondiales mais très peu observent et simulent le climat à l'échelle d'un terroir. Peu d'études abordent les conséquences futures du changement climatique sur les potentialités agroclimatiques aux échelles fines. Pourtant, dans certains terroirs (notamment en milieu accidenté), les variations des paramètres

atmosphériques sont très importantes sur des espaces relativement restreints (de l'ordre de quelques kilomètres à quelques mètres) et la qualité du raisin ou du vin est souvent en relation avec les caractéristiques locales (pente, sol, ...). Ce sont ces variations du milieu aux échelles fines qui déterminent les spécificités du terroir. Il faut donc les prendre en compte dans le cadre d'une politique raisonnée d'adaptation des terroirs viticoles au changement climatique (figure 9).

2.2 Des mesures agro-climatiques adaptées à l'échelle des terroirs

Comme indiqué dans la partie 1.2, l'acquisition des données (météorologiques et agronomiques) à l'échelle des terroirs viticoles se réalise suivant une démarche d'échelles spatiales imbriquées (figure 1). Les effets locaux (pente, exposition, type de sol, distance à la mer, ...) provoquent des variations du climat qui peuvent être supérieures à la variabilité climatique d'échelles plus vastes. C'est très souvent cette variabilité spatiotemporelle du climat liée à des phénomènes d'échelles imbriquées (du macro au microclimat) qui fournit les conditions optimales pour la croissance des cépages et qui caractérisent la spécificité d'un terroir viticole (Carey *et al.*, 2003 ; Van Leeuwen *et al.*, 2004 ; Bonnardot *et al.*, 2005 ; Jones, 2006 ; Quénol *et al.*, 2007 ; Bonnefoy *et al.*, 2011 ; Burgos *et al.*, 2011).

2.2.1 Les vignobles expérimentaux

Les terroirs expérimentaux ont été choisis en fonction de leur renommée, de leur position géographique mais aussi en fonction de leur « *historique scientifique* ». Que ce soit au niveau des disciplines de la climatologie, de l'agronomie, de l'œnologie ou de la modélisation, chaque site expérimental a été/est étudiée par un ou plusieurs partenaires scientifique du projet. Par exemple, depuis 1991, le Comité Interprofessionnel des Vins de Champagne (CIVC) a entrepris un zonage du vignoble. Cette démarche a consisté, entre autres à installer un réseau de stations automatiques dans le vignoble de Champagne. Afin d'améliorer la connaissance du climat à l'échelle locale, les stations ont été installées dans des conditions topographiques différentes (haut-, mi-, bas-coteau, fond de cuvette, ...) représentatives du vignoble champenois. De nombreuses études sur la relation climat local/vigne ont été réalisées notamment sur le risque gélif et les problèmes de maladie de la vigne (Madelin, 2004).

D'autres vignobles expérimentaux ont du être équipés en stations et en capteurs météorologiques. Au total, 20 vignobles (dont 17 ont été équipés dans le cadre de l'ANR-JC-TERVICLIM) répartis dans 13 pays sont étudiés (figure 10 et tableau 1). Ces vignobles sont situés : 1- dans un même domaine climatique (Bourgogne, Champagne, Pays de la Loire, Bordelais) ; 2- dans des domaines climatiques différents (par exemple, Champagne et Afrique du Sud) ; 3- dans des secteurs géographiquement éloignés mais avec des conditions macro-climatiques proches (ex : Afrique du Sud et Chili). Ces vignobles, même situés dans un même domaine climatique, ont leur spécificité (ex : type de cépage, mode de culture, ...) qui détermine l'identité des terroirs. Nous avons

délibérément choisi des vignobles situés dans des zones macro-climatiques différentes afin d'appréhender les variations climatiques à des échelles différentes (macro-, méso-) et de tester plusieurs modèles du GIECC.

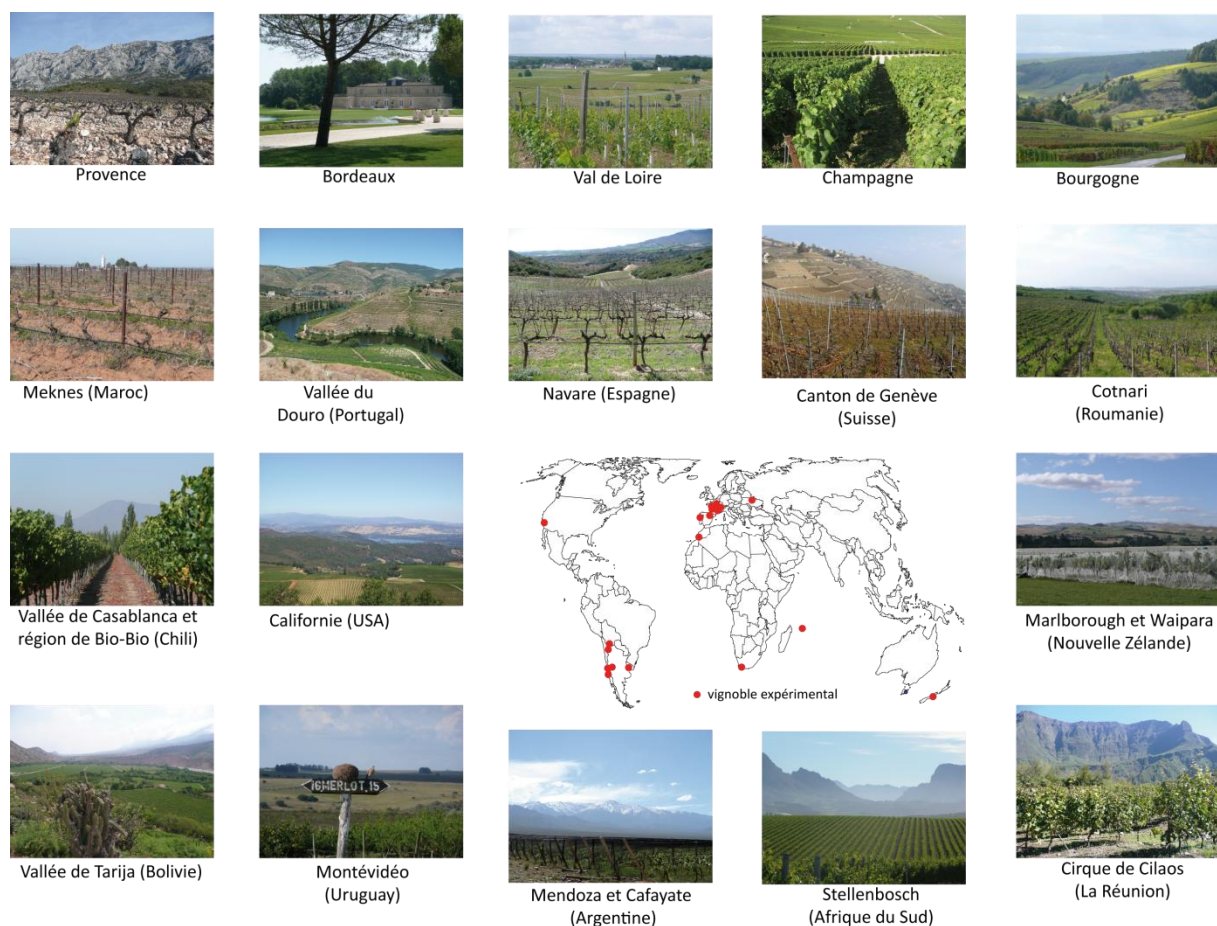


Figure 10 : Répartition des vignobles étudiés dans le cadre de Terviclim et Teradclim

Tableau 1 : Vignobles équipés en stations et capteurs météorologiques dans le cadre de l'ANR-JC-Terviclim et le GICC-Teradclim.

Les vignobles de Champagne, de Nouvelle Zélande, de la Vallée de Casablanca (Chili), de Tarija (Bolivie), de la Vallée du Douro (Portugal) étaient déjà équipés (totalement ou partiellement) en stations météorologiques par des organismes nationaux ou régionaux.

| Vignobles | Région viticole | Pays | Année de début d'installation |
|---|-----------------|--------|-------------------------------|
| Coteaux du Layon Saumurois | Val de Loire | France | 2008 |
| « Château Dauzac » « Château La Louvière » | Bordelais | France | 2010 2011 |

| | | | |
|----------------------------------|---------------------|----------------|------|
| Quinta de Napoles | Vallée du Douro | Portugal | 2010 |
| Bodéga « Alta Vista » | Mendoza Cafayate | Argentine | 2009 |
| AOC Sainte Victoire | Provence | France | 2010 |
| Bodega « Arinzano Legardeta » | Navare | Espagne | 2008 |
| Cirque de Cilaos | La Réunion | France | 2011 |
| Vallée de Tarija | Tarija | Bolivie | 2009 |
| Vallée de Los Cintes | | | 2011 |
| Vallée de Bio-Bio | Région VIII | Chili | 2008 |
| Secteur Nord de Montevideo | Montevideo | Uruguay | 2009 |
| Aloxe-Corton | Bourgogne | France | 2008 |
| Stellenbosch | Stellenbosch | Afrique du Sud | 2008 |
| Domaines Brahim Zniber | Meknes | Maroc | 2011 |
| Napa Valley | Californie | USA | 2010 |

2.2.2 L'acquisition des données agroclimatiques

La phase d'acquisition des données météorologiques en fonction des échelles spatiales imbriquées a débuté en 2008 dans le cadre du programme ANR-JC-TERVICLIM. Ces données sont également utilisées dans le projet GICC-TERADCLIM pour « alimenter » les modèles et surtout pour la phase de « validation » de la modélisation.

Avec ce dispositif de mesures et suivant cette démarche d'analyse du climat à l'échelle des vignobles, des observations à plusieurs niveaux imbriquées ont été effectués :

- 1- Pour chaque région viticole, l'analyse d'une série de données journalières ou mensuelles sur une période la plus longue possible (milieu du XX^{ème} siècle) a été réalisée pour une ou plusieurs stations météorologiques issues des réseaux nationaux. Plusieurs méthodes statistiques ont été utilisées afin de caractériser la présence ou l'absence d'une rupture significative au niveau du réchauffement climatique. La détection des ruptures climatiques a été effectuée à l'aide du test statistique de Pettitt⁴. Ces analyses statistiques ont été faites sur les données météorologiques mais également sur des

⁴ Le test de Pettitt permet de détecter la présence d'une rupture dans une série temporelle. L'absence de rupture dans la série est considérée comme l'hypothèse nulle d'homogénéité.

indices bioclimatiques adaptés à la viticulture (encadré 1). Ces indices permettent notamment de définir des régions climatiques adaptées à la viticulture. Par exemple, l'évolution de l'indice héliothermique de Huglin permet la classification climatique des vignobles dans différentes catégories du type « très frais » au « type très chaud ». Cet indice est généralement corrélé avec la teneur en sucre du raisin (Huglin et Schneider, 1998 ; Tonietto, 2004). Plusieurs indices bioclimatiques en relation avec les différents stades de croissance de la vigne ont été calculés (figure 11).

Figure 11 : Indices bioclimatiques d'origine thermique calculés durant la période de croissance de la vigne dans l'hémisphère nord.

installés à hauteur moyenne de la vigne pour chaque site expérimental (photographie 1a et b). Le choix des postes de mesures est effectué à partir de l'analyse des paramètres topographiques (altitude, pente, exposition) issus de Modèles Numériques de Terrain, de la cartographie des types de sol, des caractéristiques de la vigne (ex : cépages, ...) et de l'occupation du sol. Ces informations numériques sont intégrées dans un Système d'Information Géographique et leur combinaison par l'intermédiaire de requêtes, permet d'évaluer les différents paramètres locaux pouvant théoriquement influencer le climat.



Photographie 1 : Station météorologique CAMPBELL BWS200 (a), data logger Tinytag sous abri antiradiation RS3 (b) et Plant-Cam (c).

Encadré n°1 : les indices bioclimatiques

Les indices bioclimatiques permettent de déterminer les conditions climatiques optimales d'une région viticole. Dans le contexte du changement climatique, l'analyse temporelle des indices permet d'étudier l'évolution du climat en relation avec la viticulture notamment en caractérisant les potentialités climatiques d'une région viticole notamment en fonction des types de cépages (Morlat, 2010 ; Tonietto, 2004 ; Huglin, 1986).

Indice d'Huglin

La valeur de l'Indice de Huglin pour une station correspond à la valeur cumulée de l'indice à la date du 30 septembre, le cumul se faisant depuis le 1er avril (pour l'hémisphère Nord). Pour l'hémisphère sud, l'indice est calculé sur la période du 30 septembre au 1er avril.

$$IH = \sum [(T_m - 10) + (T_x - 10)/2] * k$$

où T_m = Température moyenne, T_x = Température maximale et k le coefficient de longueur du jour variant de 1,02 à 1,06 entre 40 et 50 degrés de latitude.

k = coefficient longueur du jour, variant de 1,02 à 1,06 entre 40 et 50 degrés de latitude :

40° 1' à 42° 0' = 1,02 ;

42° 1' à 44° 0' = 1,03 ;

44° 1' à 46° 0' = 1,04 ;

46° 1' à 48° 0' = 1,05 ;

48° 1' à 50° 0' = 1,06.

Indice de Winkler

L'indice des degrés jours de Winkler correspond à la somme des températures moyennes journalières à partir de la base de 10°C qui est effectuée du 1er avril au 31 octobre (pour l'hémisphère Nord) :

30/03

$$\text{Degrés-jours} = \sum_{01/09} (T_j - 10) \text{ (avec } T_j > 10)$$

Indice de Fraicheur des Nuits

Il correspond à la température nocturne minimale moyenne du mois qui précède la vendange (Tonietto, 1999). L'analyse de cet indice est intéressante pour évaluer les arômes du raisin.

IF Standard = Température minimale de l'air du mois de septembre dans l'hémisphère Nord et du mois de mars dans l'hémisphère Sud (moyenne des minimales en °C).

Les valeurs de chaque indice correspondent à un type de climat ou de région spécifiques.

Régions bioclimatiques

| WINKLER INDEX | | | HUGLIN INDEX | | | COOLING NIGHT INDEX | | |
|---------------|--------------|--------------|-----------------|------|------------------|---------------------|-----------------|------------------|
| Region | °C | °F | Characteristics | Rank | Range | Characteristics | Rank | Range |
| V | >2205 | ≥4000 | Very warm | IH+3 | IH > 3000 | Warm Nights | IF ₁ | IF > 18°C |
| IV | 1927 to 2205 | 3501 to 4000 | Warm | IH+2 | 2400 ≤ IH ≤ 3000 | Temperate Nights | IF ₂ | 16°C ≤ IF < 18°C |
| III | 1650 to 1926 | 3001 to 3500 | Warm Temperate | IH+1 | 2100 ≤ IH ≤ 2400 | Cool Nights | IF ₃ | 14°C ≤ IF < 16°C |
| II | 1371 to 1649 | 2501 to 3000 | Temperate | IH-1 | 1800 ≤ IH ≤ 2100 | Very Cool Nights | IF ₄ | 12°C ≤ IF < 14°C |
| I | <1371 | <2500 | Cool | IH-2 | 1500 ≤ IH ≤ 1800 | Cold Nights | IF ₅ | IF ≤ 12°C |
| | | | Very Cool | IH-3 | IH ≤ 1500 | | | |

© UMR 6554 LETG

La variabilité spatiale des paramètres atmosphériques à l'échelle d'un terroir doit être validée par l'intermédiaire des données de réponse viticoles et/ou œnologiques afin d'évaluer l'hétérogénéité de la qualité du raisin et du vin influencée par les facteurs locaux. La caractérisation de la réponse vitivinicole a porté sur la croissance de la plante en fonction de la période de son cycle végétatif (par l'intermédiaire du suivi des stades phénologiques et de la date de récolte) et sur la qualité du raisin en analysant les teneurs en sucres et acides organiques, l'acidité totale, ainsi que la teneur en anthocyanes pour les raisins rouges. Le comportement de la vigne et les analyses sur les raisins prend en compte les pratiques mises en œuvre par les viticulteurs, lesquelles, dans la majeure partie des cas ont pour objet de contrebalancer les variations climatiques saisonnières (travail effectué principalement par l'UMT VINITERA⁵). En cas de phénomènes météorologiques extrêmes comme des gelées de printemps ou des

⁵ L'UMT-Vinitera est composée de l'UVV-INRA-Angers, les laboratoires Grappe et Laress de l'ESA d'Angers, la station ITV-France du Val de Loire et la Cellule Terroirs Viticoles (49)

périodes de sécheresse, les conséquences sur les végétaux sont observées (ex : bourgeons gelés ou stress hydrique de la vigne).

Pour les suivis phénologiques et les analyses des raisins, les observations sont effectuées, dans la mesure du possible, sur des vignes ayant les mêmes caractéristiques (ex : cépages, porte-greffe, ...). Les analyses sont réalisées à proximité des stations météorologiques suivant un protocole mis en place par l'UMR VINITERA d'Angers. Par exemple, les observations phénologiques sont faites sur 25 ceps pour chaque point de mesures (méthodologie mise en place par l'UMT VINITERA).

Les observations phénologiques sont également réalisées avec des *Plantcam* (appareil photographique disposé à proximité du bourgeon de vigne) qui permettent d'enregistrer régulièrement (plusieurs fois par jour) des clichés photographiques de la croissance des bourgeons du débourrement à la maturation. Ces *Plantcam* ont été disposés dans le vignoble du Val de Loire. Les résultats étant concluants, nous envisageons d'en installer sur d'autres sites (photographie 1c).

2.2.3 Evolution des températures et des indices bioclimatiques à l'échelle des régions viticoles étudiées

Au XX^{ème} et XXI^{ème} siècles, les courbes de température à l'échelle globale ont montré une importante tendance au réchauffement surtout à partir de la fin des années 90. Les dix années les plus chaudes depuis 1950 ont été observées après 1995 (Brohan *et al.*, 2006 ; Solomon *et al.*, 2007). Cette tendance au réchauffement global a été variable d'un hémisphère à l'autre. Comme l'indique Solomon *et al.* (2007) Ainsi que Quense (2011), « pour l'hémisphère sud, particulièrement à partir des années 1980, on note une tendance à l'augmentation moins nette que dans l'hémisphère nord. Pour l'hémisphère nord, la tendance est, en moyenne, 3,5 fois plus élevée entre 1979 et 2005 par rapport à la période 1901-2005. Tandis que pour l'hémisphère sud, la tendance est similaire pour les deux périodes ».

Pour chaque vignoble expérimental du réseau TERVICLIM, nous avons analysé les séries de données annuelles (principalement la température minimale, moyenne et maximale) d'une station des réseaux nationaux sur des séries temporelles comprises entre 1960 et 2010. La plupart des stations (hormis Montevideo) ont enregistré une hausse des températures maximales et minimales. Cette augmentation est plus ou moins significative suivant la station et en fonction de la température (minimale et maximale) :

- les stations d'Europe de l'Ouest et de l'Est ont enregistré une forte augmentation moyenne des températures minimales et maximales allant de 1,5°C à plus de 2°C entre 1960 et 2010 ;
- en Espagne et au Maroc, on observe une augmentation plus importante des températures maximales ;
- sur la façade ouest des USA, ce sont les températures minimales qui ont enregistré une augmentation plus importante ;

Dans l'hémisphère sud, le réchauffement climatique a été moins intense et l'augmentation des températures minimales et maximales a été très variable suivant les secteurs (figure 12):

- de part et d'autre des Andes, l'évolution des températures a été très variable. A Curico (Chili), les températures minimales ont été de plus de 2°C alors que la tendance est très faible pour les maximales. A Mendoza (Argentine), c'est le contraire qui est observé, avec une augmentation proche de 2°C pour les maximales et de seulement 0,6°C pour les minimales ;

En Afrique du Sud, à La Réunion et en Nouvelle Zélande, l'augmentation des températures minimales et maximales est similaire (+1°C) ;

Ces résultats ont été confirmés par Carrasco (2005) qui a observé, notamment au Chili central, une augmentation de la température minimale de 1,3 à 2,1°C et de 0,2 à 1,5°C pour la température maximale. Cette tendance au réchauffement, avec d'importantes variations annuelles, est fortement influencée par le phénomène ENSO (Rosenbluth *et al.*, 1997) mais également par des facteurs régionaux tels que la topographie (massif andin pour l'Amérique du Sud). Ces observations sont conformes aux résultats des travaux réalisés sur l'évolution et la répartition des anomalies de températures en comparaison avec les normales (Hansen *et al.*, 2001 ; Hansen *et al.*, 2010).

Une analyse plus fine des séries thermiques a mis en évidence une variabilité régionale liée à des changements de circulations atmosphériques d'échelle synoptique. La courbe de la température moyenne annuelle en Nouvelle Zélande réalisée à partir des données de sept stations météorologiques (NIWA) sur la période 1941-2010 a montré une augmentation de 0,1°C par décade, avec une forte variabilité interannuelle liée aux épisodes pacifiques El Niño, particulièrement les températures froides des années 90 (figure 13).

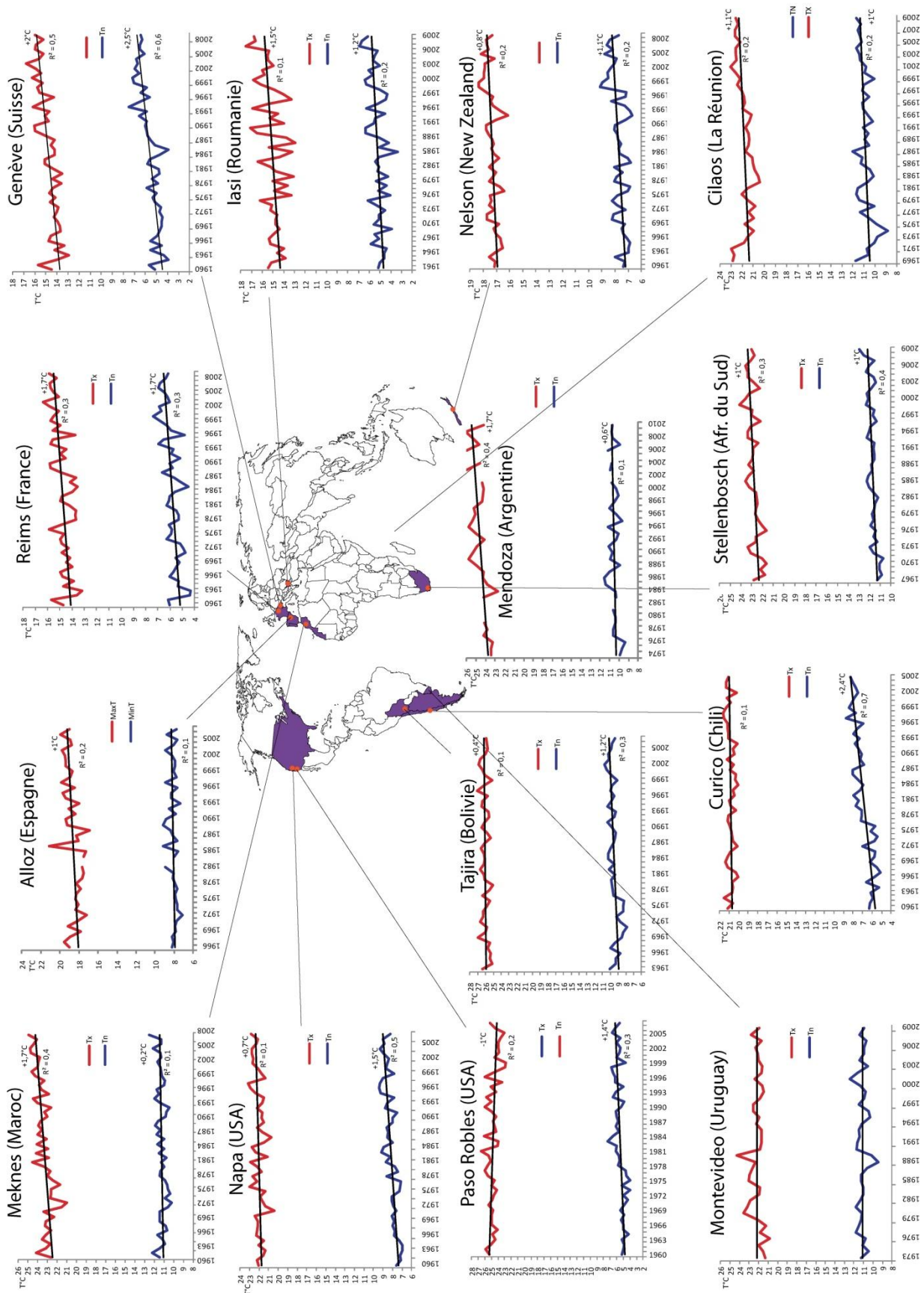


Figure 12 : Evolution des températures minimales et maximales au niveau des différents vignobles expérimentaux sur la période 1960-2010.

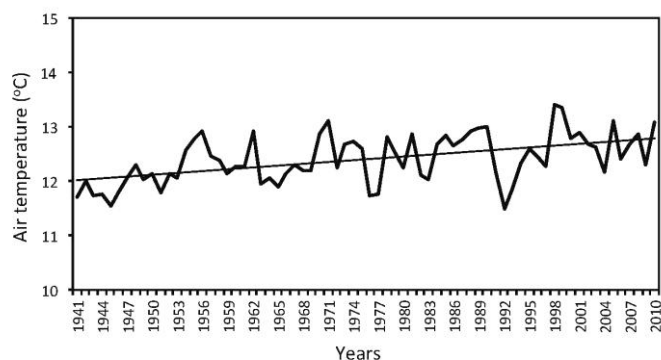


Figure 13 : Température moyenne annuelle entre 1941 et 2010 calculée à partir de 7 stations météorologiques en Nouvelle Zélande (sources : NIWA)

L'augmentation des températures est différente suivant les régions viticoles de Nouvelle Zélande. L'application de la classification des types de temps de Kidson (Kidson, 2000) pour les stations de Nelson, de Napier (Hawkes Bay) et de Queenstown (Vallée Centrale Otago) a montré une variabilité thermique régionale en relation avec l'évolution des circulations atmosphériques d'échelle synoptique. L'augmentation des températures est corrélée à l'augmentation de la fréquence des situations avec un ciel clair le long de la côte Est, à cause des conditions anticycloniques. L'évolution spatiotemporelle des températures entre 1960 et 2010 n'a pas été uniforme à l'échelle de la Nouvelle Zélande, d'importantes différences étant observées suivant les stations. Ces contrastes sont dus aux interactions entre les différentes situations synoptiques et la topographie accidentée (Sturman et Tappert, 2006 ; Sturman et Quénol, 2011). L'augmentation de la température dans la partie méridionale de l'île du Sud a été supérieure aux autres stations analysées, notamment au niveau des températures maximales (figure 14).

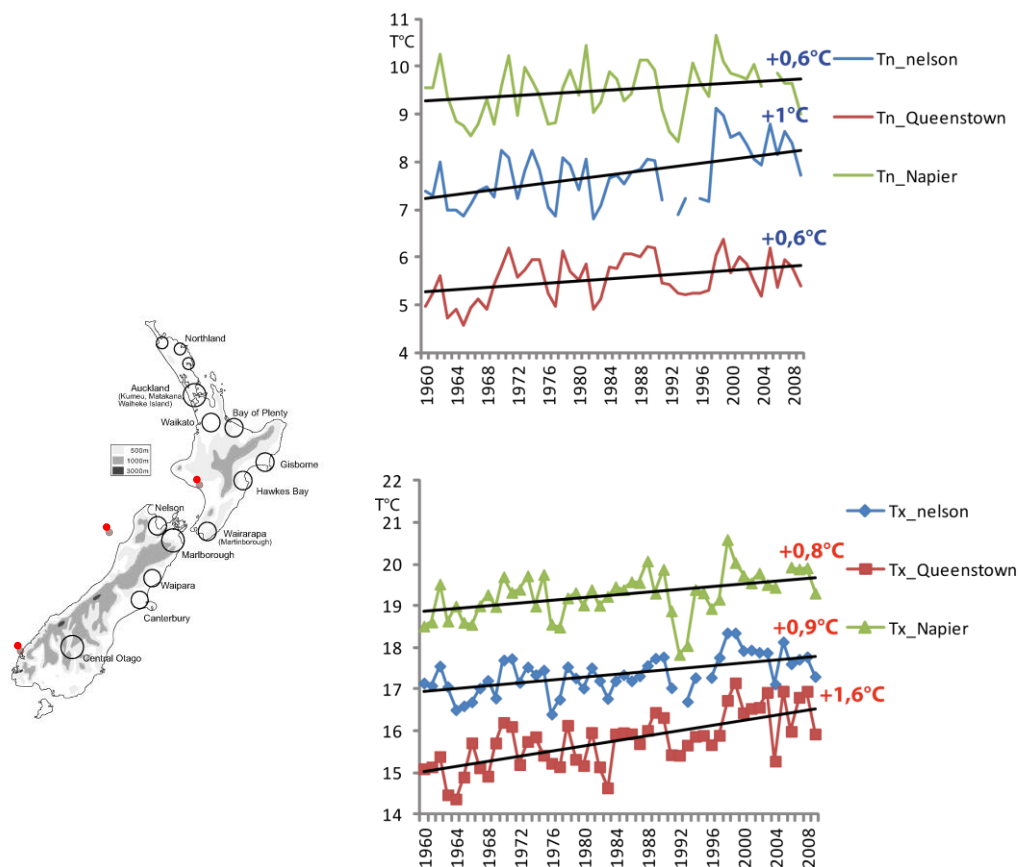


Figure 14 : Evolution des températures minimales (a) et maximales (b) dans les vignobles de la Vallée Centrale Otago (station Queenstown), de Nelson et Hawkes Bay (station Napier) entre 1960 et 2010.

Cette variabilité spatiale de l'augmentation des températures a des conséquences sur les indices bioclimatiques. D'après l'Indice d'Huglin, le type de *climat viticole* dans la Vallée Centrale Otago, qui était de type « *climat froid* » entre 1960 et 1980, est actuellement de type « *climat tempéré* », comme la région de Nelson (Nord de l'île du Sud). Les stations de Napier (Hawkes Bay) et de Queenstown (Vallée Centrale Otago) ont enregistré une augmentation de 200 degrés/jours alors que la station de Nelson n'a pas eu d'augmentation de l'indice d'Huglin (figure 15).

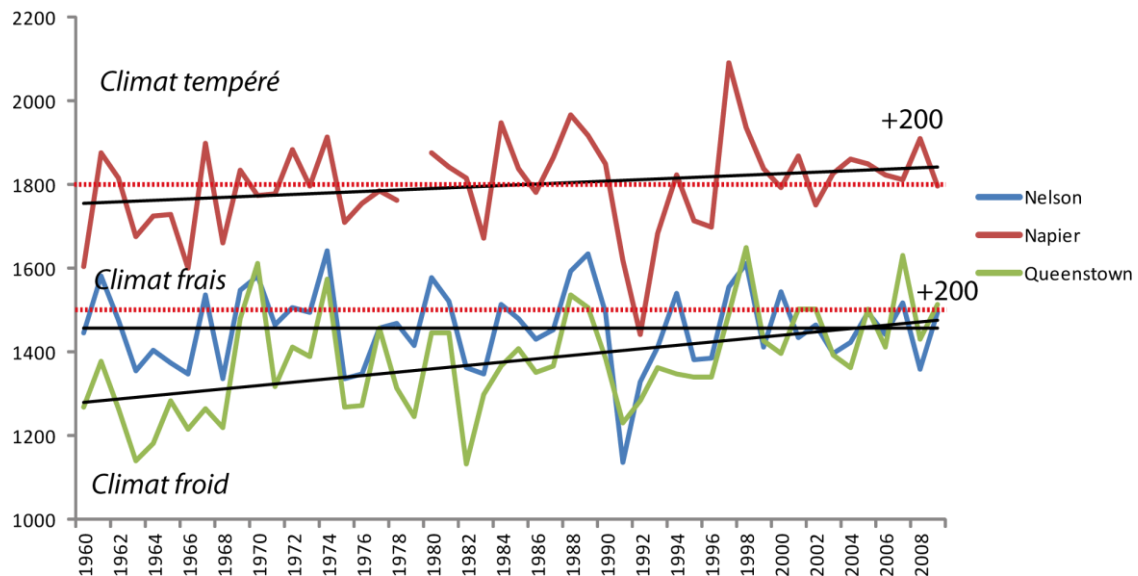


Figure 15 : Evolution de l'Indice d'Huglin dans les vignobles de la Vallée Centrale Otago (station Queenstown), de Nelson et Hawkes Bay (station Napier) entre 1960 et 2010 (sources : NIWA).

2.2.4 Application au vignoble du Val de Loire

Dans le Val de Loire, l'analyse a été réalisée suivant la démarche multiscalaire imbriquée exposée dans le chapitre 2.2.2, c'est-à-dire (1) à l'échelle de la région viticole du Val de Loire puis (2) à l'échelle des vignobles d'Anjou et du Saumurois et (3) à l'échelle de l'appellation « *Quart de Chaumes* » :

- (1) Les données thermiques hebdomadaires et mensuelles de 10 stations de Météo-France du Centre Ouest de la France ont été analysées de 1948 à 2010 (figure 16a). Les indices bioclimatiques ont également été calculés.
- (2) Un réseau de 11 stations météorologiques Campbell a été installé en 2008 (dans le cadre de l'ANR-JC-TERVICLIM et des programmes de recherches de l'UMT VINITERA) dans les vignobles d'Anjou et du Saumurois (figure 16b).
- (3) Plus de 20 *Data Logger* enregistrant la température ont été disposés dans le vignoble de l'appellation « *Quart de Chaumes* ». L'appellation « *Quart de Chaumes* » dans les Coteaux du Layon s'étend sur un secteur d'environ 2km sur 3km. Cette appellation est définie par des caractéristiques de sol, d'exposition (principalement sud), d'environnement (proximité de la rivière Le Layon) et de cépage (Chenin) spécifiques. C'est la combinaison de ces caractéristiques (plus le travail du vigneron) qui permettent d'élaborer ce vin liquoreux avec sa spécificité reconnue. Le climat particulier de ce terroir permet la production de vin liquoreux suite à la formation d'un champignon (*Botrytis Cinerae*) et à des vendanges tardives (Duchêne, 1996), en général au mois d'octobre voire novembre. Le choix des postes de mesures a été effectué avec l'utilisation de la cartographie des terroirs (type de sol, type de cépages, pratiques agricoles,...) réalisée par l'UMT VINITERA, un Modèle Numérique de Terrain (pente,

exposition, ...), la cartographie de l'occupation du sol et les conseils des viticulteurs (figure 16c).

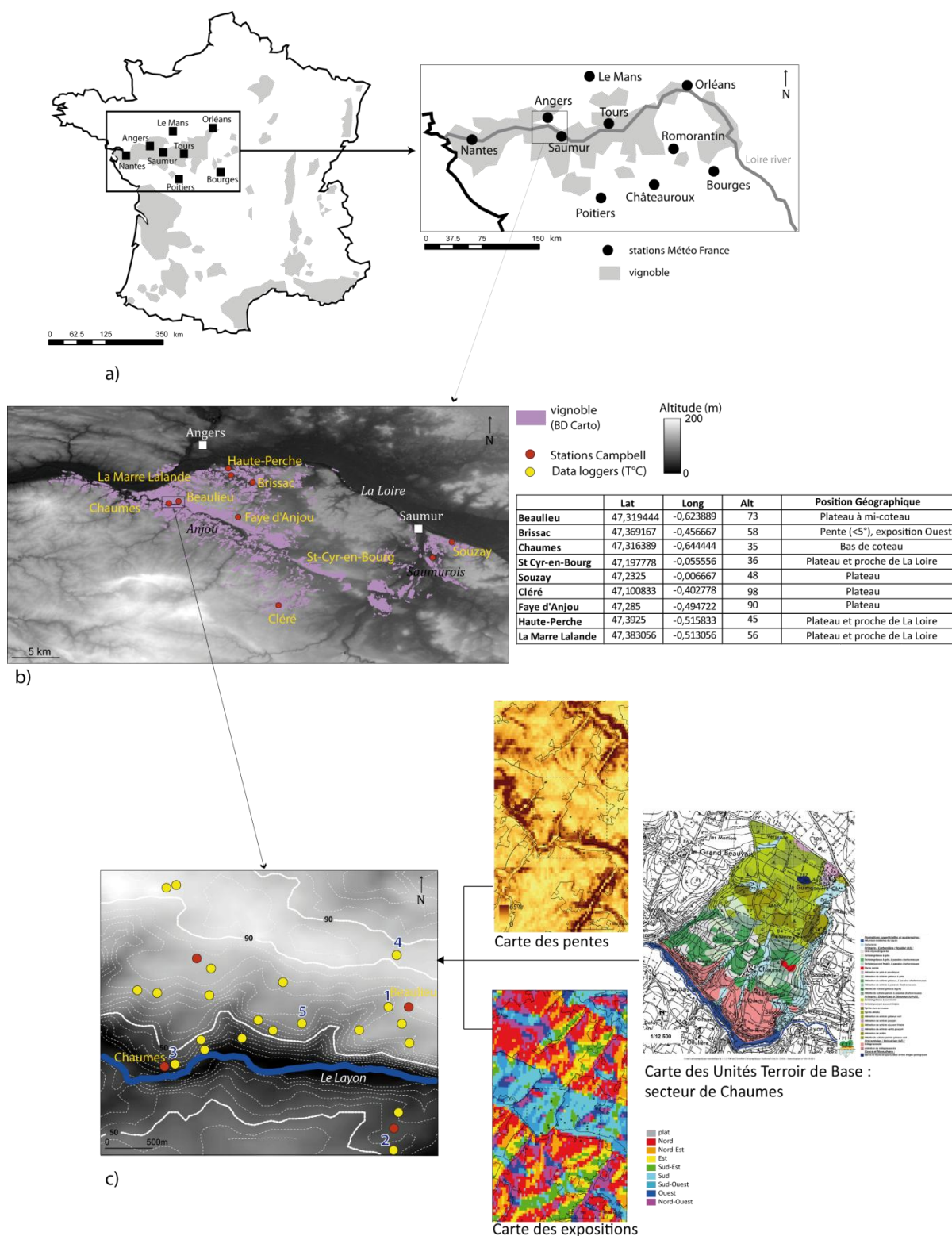


Figure 16 : Stations et capteurs météorologiques disposés en fonction des échelles spatiales imbriquées : a) de la Vallée de la Loire, b) en passant par les vignobles d'Anjou et Saumurois c) jusqu'au Quart de Chaumes

2.2.4.1 Températures et indices bioclimatiques à l'échelle du Val de Loire

Comme l'indique Bonnefoy (2010), l'observation des températures moyennes annuelles depuis le milieu du XX^{ème} siècle montre une nette tendance au réchauffement depuis la fin des années 1980 pour l'ensemble des stations du Centre-Ouest. Le test statistique de *Pettitt* (réalisé entre 1951 et 2008 pour toutes les stations) signale une rupture climatique en 1987 commune à toutes les stations. L'augmentation de la température moyenne annuelle a ainsi été de 0,8°C (Nantes) à 1°C (Angers) entre les périodes pré-rupture et post-rupture. En dépit de cette rupture observée en 1987, un premier maximum de température est présent à l'après-guerre suivi par un rafraîchissement dans les années 70 : ce sont des oscillations déjà bien connues et décrites (Pédelaborde, 1957 ; Pagney, 1988).

Les températures moyennes maximales (Tx) ont montré également une nette tendance vers un réchauffement dès la fin des années 1980. La rupture de 1987 est stable pour toutes les stations selon le test de *Pettitt*. Ainsi, la hausse des Tx varie de 0,8°C (Nantes) à 1,3°C à (Saumur).

Les nuances des températures moyennes minimales (Tn) sont plus marquées que pour les Tx, et leur évolution depuis la fin des années 50 semble plus contrastée. En effet, la rupture est beaucoup moins stable que pour les Tx, observée de 1980 à 1993 selon les stations. De plus, la courbe d'évolution des Tn laisse présager une stagnation puis une baisse des Tn dans les années 2000 (Bonnefoy *et al.*, 2010) (figure 17).

Le réchauffement climatique se manifeste de manière généralisée dans tout le Val de Loire et, à une plus large échelle, sur l'ensemble du Centre-Ouest de la France, mais il semble surtout affecter les Tx (figure 17).

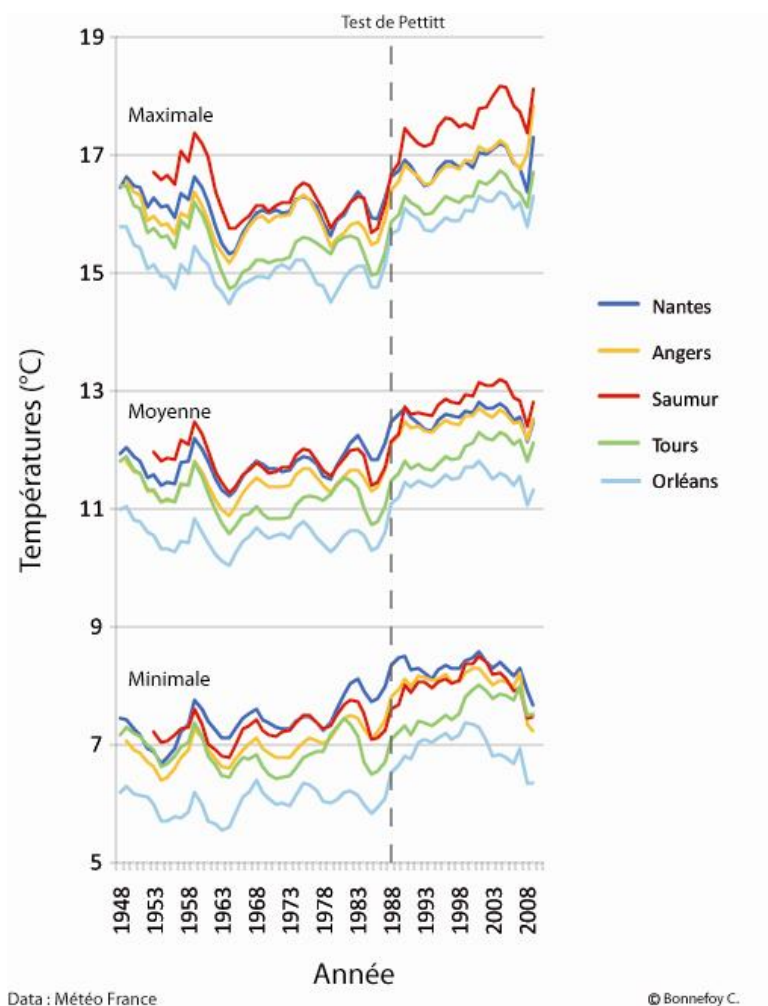


Figure 17 : Températures moyennes, minimales et maximales annuelles pour des stations représentatives du climat régional du Val de Loire (1948-2008)

L'analyse des températures sur la période 1948-2008 montre aussi une variabilité spatiale entre les stations. C'est cette analyse spatiale des températures qui permet de définir le climat à l'échelle régionale. L'influence océanique marquée à Nantes, station bénéficiant du climat maritime propre à la bordure atlantique française (Planchon, 1994 et 1997), s'atténue lorsqu'on se dirige vers l'intérieur des terres. En effet, certains caractères climatiques « continentaux » apparaissent progressivement en direction de l'est, à travers les bas plateaux du sud du bassin parisien. Ainsi, à Nantes qui représente bien le climat maritime atlantique, les hivers y sont les plus doux avec la température moyenne du mois de janvier la plus élevée de toutes les stations ($5,3^{\circ}\text{C}$) et des étés sans grande chaleur (température moyenne du mois de juillet de $19,1^{\circ}\text{C}$). L'amplitude thermique annuelle reste ainsi relativement faible ($13,8^{\circ}\text{C}$). Cette douceur hivernale liée à la proximité de l'océan s'atténue progressivement vers l'Est. Les autres stations (hormis Angers et Saumur) connaissent toutes des hivers plus rigoureux avec une température moyenne en janvier comprise entre $3,2$ et $4,1^{\circ}\text{C}$. L'amplitude thermique annuelle de ces mêmes stations est plus élevée en raison d'un été plutôt chaud. Cependant, à l'effet de la continentalité s'ajoute l'influence de l'altitude ou, plus précisément, de la topographie. En effet, plusieurs stations de référence dans cette étude

(Tours et Orléans) sont situées sur des plateaux peu élevés (environ 100 à 150 m), mais toutefois suffisamment surélevés par rapport aux vallées qui les traversent, y compris la Loire.

Saumur se démarque particulièrement des autres stations en raison de son été chaud. Cette station enregistre la température maximale moyenne en juillet la plus élevée de tout le Val de Loire (25,6°C). Ce climat apparemment plus clément que dans les autres stations s'explique par la situation de la station au centre du bassin inférieur de la Loire, et protégée à l'ouest et au sud-ouest par les plateaux et collines les plus élevés de l'espace étudié (les Mauges atteignent 216 m au Puy des Gardes). Saumur se trouve donc relativement abritée des circulations perturbées d'origine atlantique (Escourrou, 1982 ; Quénol *et al.*, 2008).

Ainsi, les nuances climatiques au sein du Val de Loire sont bien présentes et s'expliquent notamment par la distance des stations par rapport à l'océan ou à la Loire, à leur position latitudinale et à leur altitude. Le Saumurois en ressort particulièrement privilégié avec des températures relativement élevées toute l'année par rapport aux autres stations et avec la deuxième température moyenne annuelle la plus élevée après Nantes, marquant ainsi une rupture dans l'évolution générale vers la continentalité lorsqu'on se dirige vers l'est. Ces contrastes climatiques régionaux montrent d'une part que les conditions bioclimatiques de la vigne et la qualité du raisin qui en résulte peuvent être différentes d'un vignoble à l'autre (Bonnefoy *et al.*, 2010).

L'analyse des indices bioclimatiques confirme la tendance au réchauffement pour la totalité des stations. La hausse de l'indice de *Winkler* (calculé entre 1965 et 2010) n'a pas la même intensité suivant les stations. A Nantes, l'augmentation de l'indice de *Winkler* est moins importante que pour les autres stations (+148 Dj). En revanche, la hausse de l'indice est maximale dans l'Anjou (+198 Dj) et surtout le Saumurois (+233 Dj). Ainsi, Saumur qui connaît un climat plus doux que les autres stations, notamment du fait de sa position géographique, se réchauffe également plus vite. Tours a également gagné 184 Dj entre les deux périodes (figure 18).

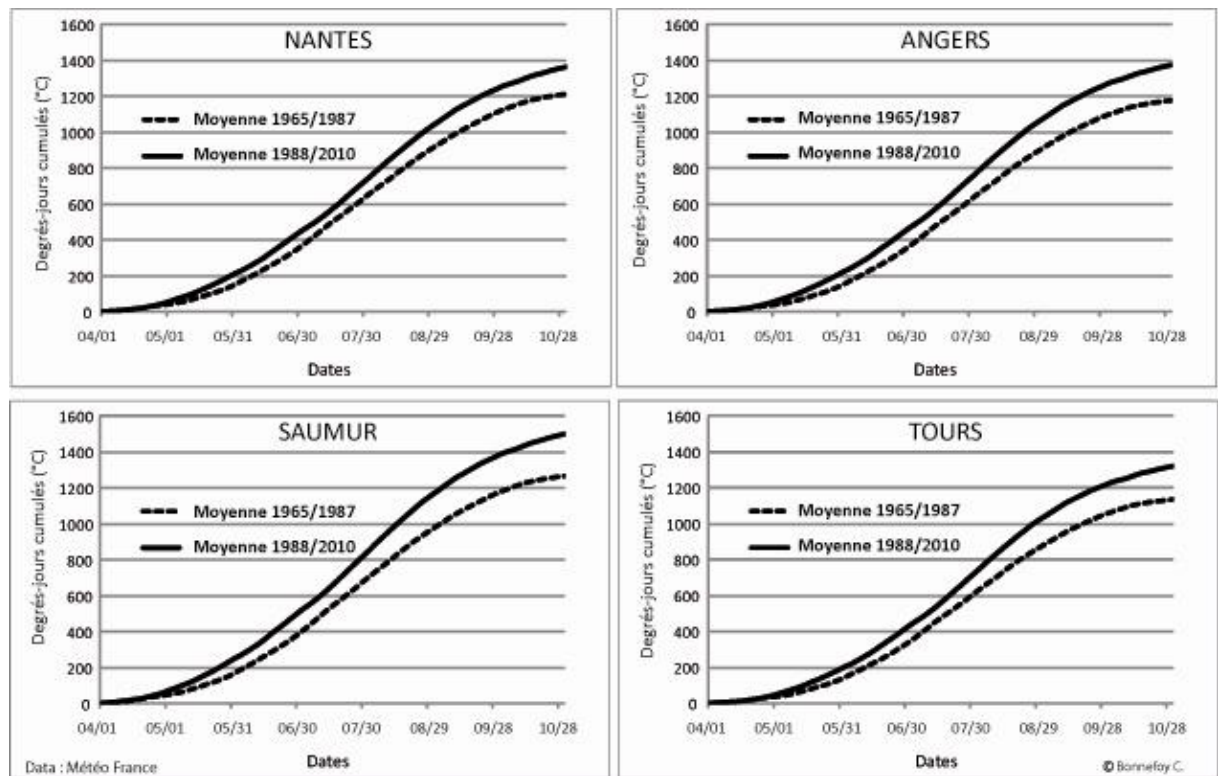


Figure 18 : Evolution de l'Indice de Winkler avant et après la rupture d'homogénéité des séries climatiques (1953-2008) (d'après Bonnefoy et al., 2011)

Cette hausse de l'indice de *Winkler* a donc des conséquences sur la phénologie de la vigne. L'apport de chaleur pour chaque phénophase étant atteint plus tôt dans la saison, les viticulteurs observent déjà une plus grande précocité de ces stades, parfois de 15 jours à 3 semaines, comme cela a pu être montré en Bourgogne ou dans le Bordelais (Jones *et al.*, 2005 ; Madelin *et al.*, 2008). De plus, la croissance de la vigne et en particulier la maturité, se déroule désormais sous des conditions plus chaudes, notamment au mois d'Août. Le test de *Pettitt* nous indique pour les Tx du mois d'Août une rupture climatique en 1986 à Saumur (significativité : 99%) et Nantes (95%) et en 1988 à Angers (99%) et Tours (95%). Ainsi les Tx moyennes entre la période pré- et post-rupture ont augmenté d'environ 2°C selon les stations, passant de 24,6°C à 26,8°C à Saumur, de 23,7°C à 25,3°C à Nantes, de 24,2°C à 26°C à Angers et de 24,3°C à 26°C à Tours (Bonnefoy *et al.*, 2010 et 2009).

L'indice de *Huglin* (1950-2010) est également influencé par l'augmentation des températures notamment avec une évolution vers des valeurs plus élevées à partir des années 1980. Nous retrouvons la période chaude des années 1950 et la période plus froide des années 70, mais la hausse des valeurs est plus intense dès la fin des années 80. Le test statistique de *Pettitt* confirme la rupture climatique pour cet indice en 1987 pour Nantes, 1986 pour Saumur et 1988 pour Angers et Tours. Ainsi, la plupart des stations étaient classées, avant la rupture climatique, dans la catégorie des climats viticoles frais voire en climat tempéré pour Saumur dans les années 1950 et au début des années 1960. Après la rupture d'homogénéité sérielle, les stations se trouvent plutôt

classées dans des climats désormais plus tempérés voire tempérés chauds à Saumur au début des années 2000. Cependant, Tours qui est au départ une station plus fraîche que les autres, n'est passée dans la catégorie des climats tempérés qu'au début des années 2000 grâce à une succession d'années chaudes (Bonnefoy *et al.*, 2010) (figure 19).

Nous pouvons donc constater une hausse de l'indice de *Huglin* dans le Val de Loire depuis le milieu du XX^{ème} siècle. Si nous observons le profil de l'indice à toutes les stations, Saumur semble plus sensible aux périodes chaudes. En effet, la variabilité temporelle semble plus marquée en amplitude que dans les autres stations, d'où sans doute la réaction plus prononcée de Saumur au réchauffement climatique contemporain. Cette hypothèse reste cependant à confirmer. Cette étude est intéressante, car elle permet de poser la question de l'évolution future de cet indice. Chaque catégorie de climat correspond à des types de cépages pouvant être plantés afin d'optimiser la récolte. Si les vignobles changent de catégories climatiques, c'est l'ensemble des cépages qui pourrait être remis en question.

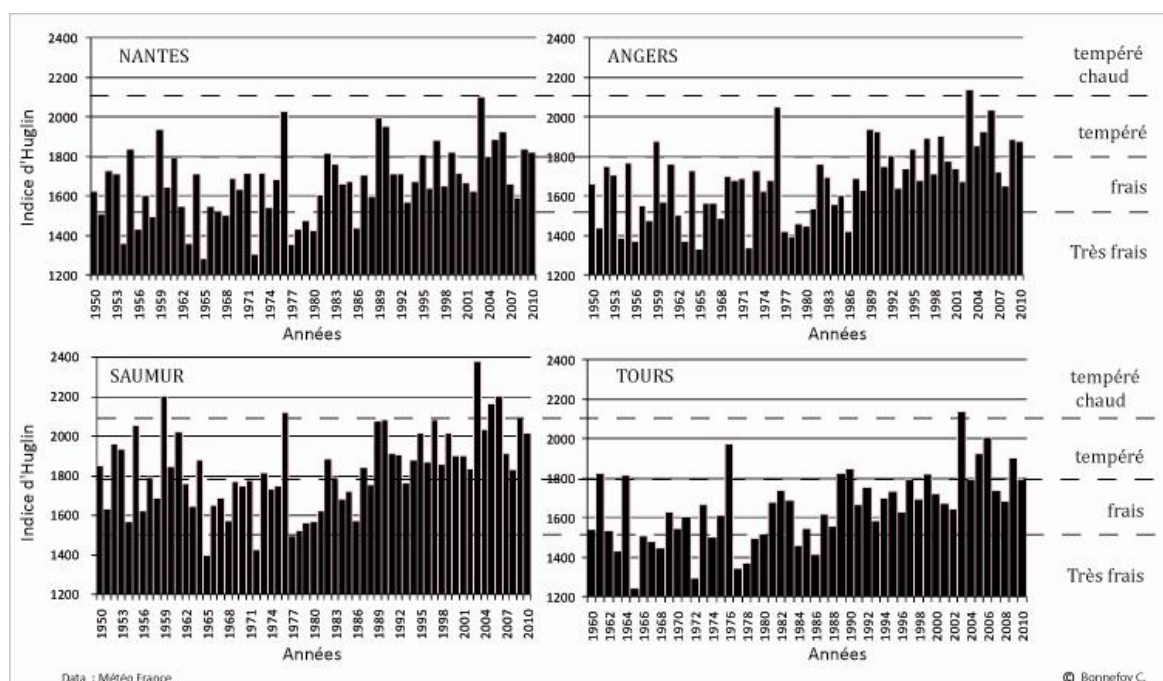


Figure 19 : Evolution de l'Indice de Huglin (1960-2010) à Nantes, Angers, Saumur et Tours (d'après Bonnefoy *et al.*, 2011).

Ces changements bioclimatiques ont des impacts sur les caractéristiques du raisin récolté, notamment la quantité de sucre (augmentation) et l'acidité (diminution), la teneur en anthocyanes (légère augmentation) et donc, sur la typicité des vins produits (Barbeau, 2007).

Au niveau des stades phénologiques, Barbeau (2007) a observé sur la période 1976-2007, sur le domaine expérimental de l'INRA de Montreuil Bellay, une avancée moyenne de la date de floraison (quelque soit le cépage) de la 2^{ème} à la 1^{ère} quinzaine de juin, ainsi qu'une avancée de la véraison de la 2^{ème} à la 1^{ère} quinzaine d'août pour les cépages Gamay et Grolleau et de fin août/mi-septembre à mi-août pour les Cabernets. La date

moyenne de vendange est plus précoce de 15 jours pour le Grolleau et le Gamay et de 10 et 8 jours pour le Cabernet Franc et le Cabernet Sauvignon (Barbeau *et al.*, 2004).

A l'échelle de la Vallée de la Loire, nous avons observé une importante variabilité spatiotemporelle des températures liée à un gradient océanique/continentalité ainsi qu'à la topographie et à la distance à la Loire. Le second niveau d'analyse consiste à analyser les données des stations météorologiques installées spécifiquement dans les vignobles d'Anjou et du Saumurois.

2.2.4.2 *Températures et phénologie de la vigne à l'échelle de l'Anjou et du Saumurois*

Le réseau de stations météorologiques a été installé dans les terroirs d'Anjou et du Saumurois en 2008. Les stations ont un pas de temps de 15 minutes. Ici, nous présentons les températures quotidiennes minimales, maximales et moyennes en 2010 durant la période de végétation de la vigne (1^{er} avril - 31 octobre). Les Indices de *Huglin* et de *Winkler* ont été calculés pour les 9 stations. L'indice de fraîcheur des nuits a également été calculé entre la mi-août et à la mi-septembre.

Les différences de températures observées entre les 9 stations météorologiques disposées dans les vignobles sont dues à leur situation géographique et topographique. Les températures minimales moyennes calculées durant la période de croissance de la vigne sont supérieures à 10°C (encadré n°1). Les plus basses sont observées à Chaumes (9,4°C) dont la station est située en bas de coteau à proximité de la rivière du Layon. Cette observation peut être expliquée par l'importante fréquence des inversions thermiques au cours des nuits claires et calmes dans ce secteur. L'analyse à l'échelle régionale (ch. 2.2.4.1) a montré que Saumur était la station la plus chaude du Val de Loire de part sa situation géographique. Par conséquent, les températures minimales les plus élevées sont enregistrées dans la région de Saumur (Souzay) et au niveau des stations les plus proches de la Loire (Haute-Perche). En effet, la Loire limite le refroidissement nocturne, et le réchauffement diurne. Les températures maximales les plus élevées ont été enregistrées en Cyr-en-Bourg et à Chaumes (23,7°C). Ainsi, Chaumes est la station où l'amplitude thermique diurne est la plus importante. Cette situation climatique locale est très favorable pour la formation du *Botrytis Cinerae* (pourriture noble) qui permet la production du vin liquoreux le « *Quart de Chaumes* » (Duchêne, 1996). Toutefois, les températures minimales relativement froides au niveau de cette station peuvent accentuer le risque gélif dans ces secteurs en bas de coteau notamment au printemps lorsque les bourgeons sont très sensibles aux basses températures. Les températures minimales moyenne d'avril ont été enregistrées à Chaumes (4,3°C) où les épisodes de gel sont fréquents alors que les stations disposées près de la Loire ont des températures minimales moyennes beaucoup plus clémentes (Haute-Perche : 6,6°C). En été, les températures maximales moyennes >25°C sont observées durant 3 mois à Chaumes (*Coteaux du Layon*) alors qu'elles ne dépassent pas 1 mois pour les autres stations (tableau 2).

Tableau 2 : Températures minimales moyennes (a) et maximales (b) dans l'Anjou et le Saumurois.

| | APRIL | MAY | JUNE | JULY | AUGUST | SEPTEMBER | SEASON |
|------------------|-------|-----|------|------|--------|-----------|--------|
| Beaulieu | 5.2 | 7.7 | 12.3 | 14.0 | 12.6 | 9.4 | 10.2 |
| Brissac | 5.8 | 8.3 | 12.6 | 14.4 | 13.1 | 9.6 | 10.6 |
| Chaumes | 4.3 | 7.3 | 11.8 | 13.2 | 11.8 | 8.1 | 9.4 |
| St Cyr-en-Bourg | 5.9 | 8.7 | 12.8 | 14.3 | 13.0 | 9.2 | 10.6 |
| Souzay | 6.0 | 8.7 | 13.2 | 14.8 | 13.4 | 9.9 | 11.0 |
| Cléré | 5.3 | 8.0 | 12.2 | 13.9 | 12.9 | 9.5 | 10.3 |
| Faye d'Anjou | 5.5 | 8.1 | 12.4 | 14.1 | 12.9 | 9.7 | 10.5 |
| Haute-Perche | 6.6 | 8.5 | 12.9 | 14.8 | 13.5 | 10.0 | 11.0 |
| La Marre Lalande | 6.0 | 8.6 | 12.6 | 14.5 | 13.3 | 9.7 | 10.8 |

Maxi

Mini

0 - 4.9°C

5 - 9.9°C

10 - 14.9°C

| | APRIL | MAY | JUNE | JULY | AUGUST | SEPTEMBER | SEASON |
|------------------|-------|------|------|------|--------|-----------|--------|
| Beaulieu | 17.5 | 18.2 | 23.9 | 27.4 | 24.8 | 22.1 | 22.3 |
| Brissac | 17.3 | 18.2 | 23.6 | 27.2 | 24.2 | 21.9 | 22.1 |
| Chaumes | 19.0 | 19.6 | 25.2 | 28.7 | 26.1 | 23.5 | 23.7 |
| St Cyr-en-Bourg | 18.9 | 19.7 | 25.1 | 28.8 | 26.5 | 23.5 | 23.7 |
| Souzay | 18.7 | 19.6 | 24.7 | 28.2 | 25.7 | 23.3 | 23.4 |
| Cléré | 17.3 | 18.3 | 23.7 | 27.4 | 25.5 | 22.6 | 22.5 |
| Faye d'Anjou | 17.2 | 17.8 | 23.5 | 27 | 24.2 | 21.9 | 21.9 |
| Haute-Perche | 18.2 | 18.4 | 23.9 | 27.7 | 24.7 | 22.2 | 22.5 |
| La Marre Lalande | 17.6 | 18.6 | 24.1 | 27.7 | 24.7 | 22.3 | 22.5 |

15 - 19.9°C

20 - 24.9°C

25 - 29.9°C

© Bonnefooy C.

Data : Terviclim/INRA

L'analyse des indices bioclimatiques est conforme à celle des températures. Suivant l'indice de *Winkler*, hormis les stations St Cyr en Bourg et de Souzay qui correspondent à la région II (secteur de Saumur), les autres sont en régions I (cf. encadré 1). Selon l'Indice de *Huglin*, la plupart des stations correspondent à un « climat tempéré » mais les stations d'Anjou de Beaulieu, de Brissac et de Faye sont dans un « climat frais ». Comme cet indice prend en compte les températures maximales, la station de Chaumes, qui enregistre les températures maximales les plus élevées, a donc l'indice le plus élevé. Le calcul de fraîcheur des nuits est supérieur à 12°C, excepté à Chaumes (11,2°C). Au contraire, cet indice est plus fort à Beaulieu (12°C) où la station est située à quelques centaines de mètres de Chaumes mais dans des conditions topographiques différentes. L'indice de fraîcheur des nuits, développé par Tonietto et Carbonneau (2004), prend en compte la moyenne des minima durant le mois précédent la maturation (mi-août à mi-septembre). Il permet d'évaluer les conditions nocturnes favorables à la synthèse des anthocyanes pendant la maturation. Des études complémentaires ont montré que cette valeur moyenne devait être affinée en intégrant l'amplitude thermique diurne (Jones, 2007). D'après cet indice amélioré, la station Chaumes apparaît comme ayant des conditions favorables pour le développement des arômes (figure 20).

Des différences importantes des températures et des indices ont été observées entre les stations selon leur position géographique et topographiques (ex : proximité de la Loire, sur un plateau, en bas de coteau, ...). Les stations situées près de la Loire ont des températures minimales et maximales plus douces d'où une amplitude diurne assez faible. Inversement, dans les Coteaux du Layon, on observe des différences thermiques importantes liées d'une part, à l'éloignement de la Loire et d'autre part, à des effets topographiques locaux. Les stations de Chaumes et de Beaulieu, géographiquement très proches, enregistrent des températures et des indices très différents à cause de leur position topographique. La station de Chaumes qui est située en bas de coteau avec une exposition de sud, est soumise à une forte amplitude thermique diurne. Ce sont ces caractéristiques locales spécifiques qui définissent (en partie) la délimitation de l'Appellation « *Quart de Chaumes* ».

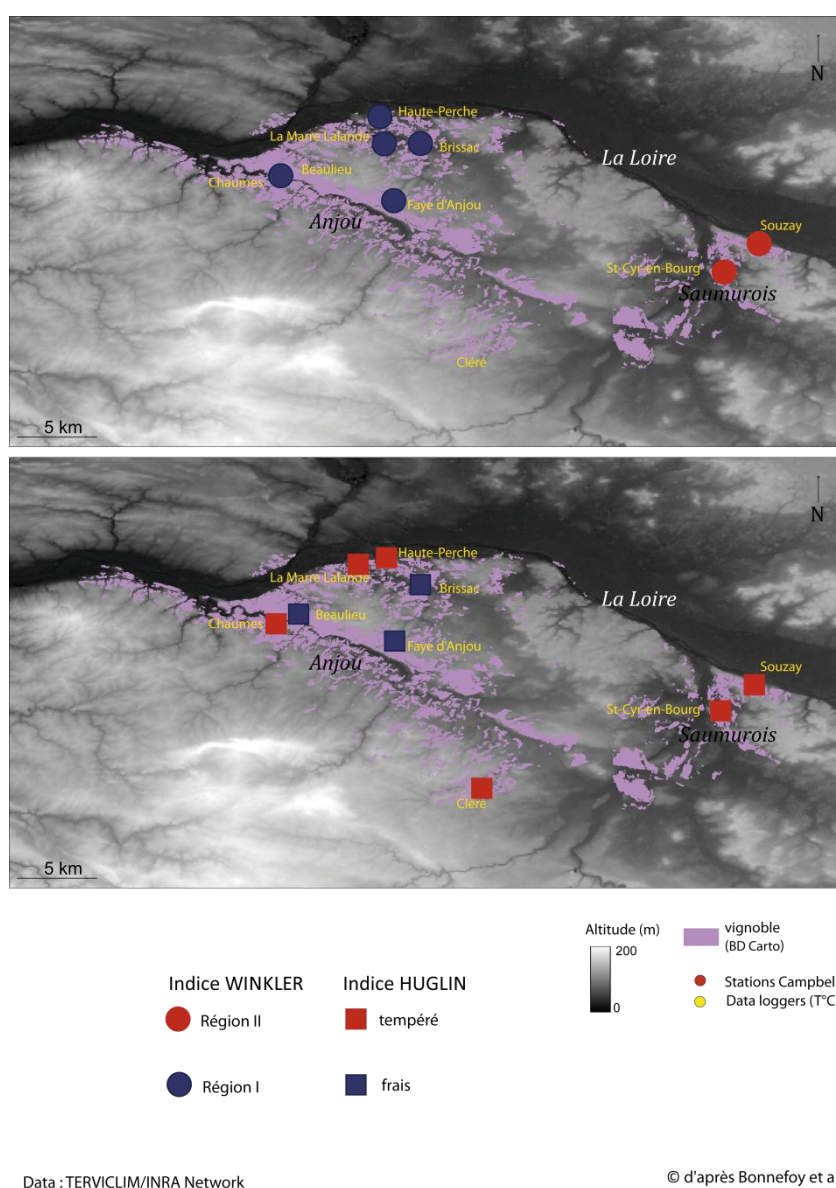


Figure 20 : Indices de Winkler (a) et d'Huglin (b) dans l'Anjou et le Saumurois

En parallèle avec les observations climatiques, les « réponses » sur la vigne sont analysées avec des observations phénologiques. La figure 17a et b présente les résultats du suivi phénologique en 2008 sur le cépage *Cabernet Franc*. Les observations ont été effectuées selon une méthodologie définie par l'UMT VINITERA (Séverine Roger, Etienne Neethling et Gérard Barbeau). Au début du débourrement, les premiers bourgeons qui sortent de la dormance (01/04/08) se situent sur les parcelles proches de la Loire. Il y a à peu près 1 semaine de décalage avec la parcelle de Brissac. Au cours du débourrement, lorsque la vigne a débourrée à 50%, les écarts sont beaucoup plus faibles. C'est la station La Marre Lalande qui est la plus précoce avec 2 jours d'avance sur les autres. Toutefois, la station Haute-Perche, qui était précoce au début du débourrement, a connu un ralentissement de sa croissance par rapport aux autres parcelles expérimentales (figure 21a).

Au moment de la véraison, les 2 parcelles proches de la Loire sont plus précoces d'environ 2 jours par rapport à la parcelle de Brissac. Cet écart est régulier entre le début de la véraison et la véraison complète (figure 21b).

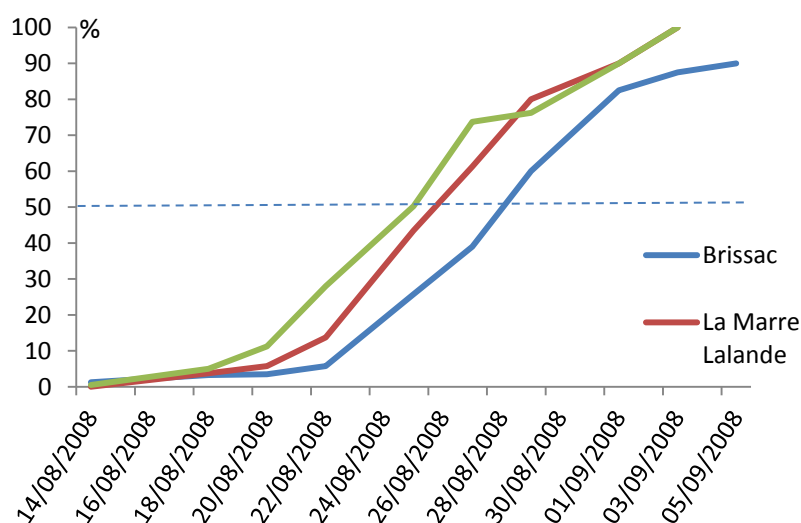
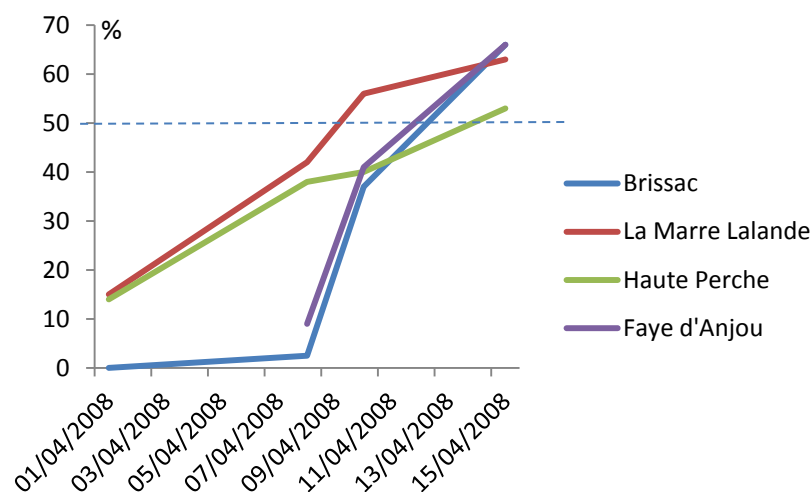


Figure 21 : Observations phénologiques au cours du débourrement (a) et de la véraison (b) en 2008 en Anjou.

2.2.4.3 Températures et indices bioclimatiques à l'échelle du « Quart de Chaumes »

L'analyse des capteurs thermiques disposés dans le vignoble des Coteaux du Layon au niveau de l'appellation « Quart de Chaumes » a mis en évidence une forte variabilité spatio-temporelle des températures liée à la topographie (pente et exposition), à la distance à la rivière et au type de sol.

Les températures minimales moyennes mensuelles enregistrées de mai à octobre 2009 ont montré d'importants contrastes thermiques entre les secteurs en haut et en bas de coteau. La température minimale moyenne a été enregistrée au point n°3 (figure 16c) avec une moyenne de 8,8°C. Ce capteur est situé avec une exposition de sud-est dans le fond de la vallée du Layon à une altitude de 33 mètres. Les postes de mesures situés en haut de coteau voir à mi-coteau ont enregistré des températures minimales moyennes beaucoup plus élevées. Par exemple, la température du point n°1 qui est situé à 82 mètres en haut de coteau avec une exposition sud-ouest, a eu une température de 10,6°C soit 2°C de plus que le n°3. Le capteur situé en haut de coteau et enregistrant la température minimale moyenne la plus basse a été le n°2. Ce capteur est situé sur le versant Nord et à une altitude de 32 mètres.

Concernant les températures maximales moyennes, les plus élevées ont été enregistrées sur le point n°3 (25°C), c'est-à-dire celui disposé en bas de coteau où la température minimale moyenne la plus basse a été enregistrée. Par conséquent, ce secteur est soumis à une forte variabilité thermique diurne. Les plus basses températures maximales ont été observées en haut de coteau comme au point n°4 (capteur le plus élevé à 90 mètres) et au n°1. Les moyennes des températures maximales sur la saison phénologique ont été de 23°C pour ces deux capteurs de haut de coteau. Par conséquent, les amplitudes thermiques les plus fortes sont observées en bas de coteau alors que les amplitudes sont plus modérées sur les hauts de coteau (Bonnefoy *et al.*, 2010).

Ces contrastes thermiques importants s'expliquent, en partie, par la topographie variée du secteur des Coteaux du Layon avec notamment la mise en place d'inversions thermiques assez fréquentes lors de nuits radiatives claires (Bonnefoy *et al.*, 2009 ; Quénot, 2002). Ainsi, l'air froid a tendance à stagner dans les bas fonds à proximité du Layon, ce qui peut poser des problèmes de gels tardifs en période de débourrement de la vigne. Les plateaux et hauts de coteaux sont moins exposés à ce risque de gel (figure 22). Pour les températures maximales, l'exposition, la pente, le type de sol ainsi que les secteurs abrités sont des éléments clés pouvant expliquer les contrastes thermiques observés.

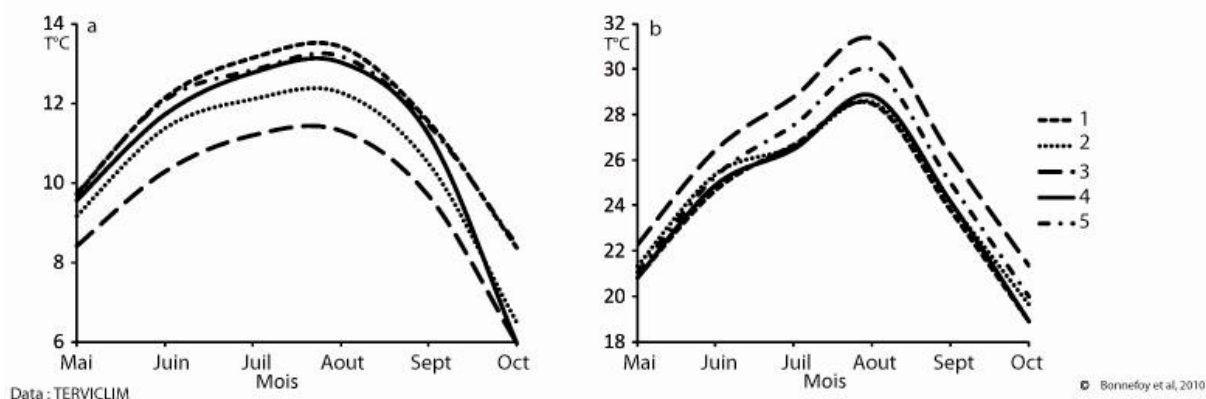


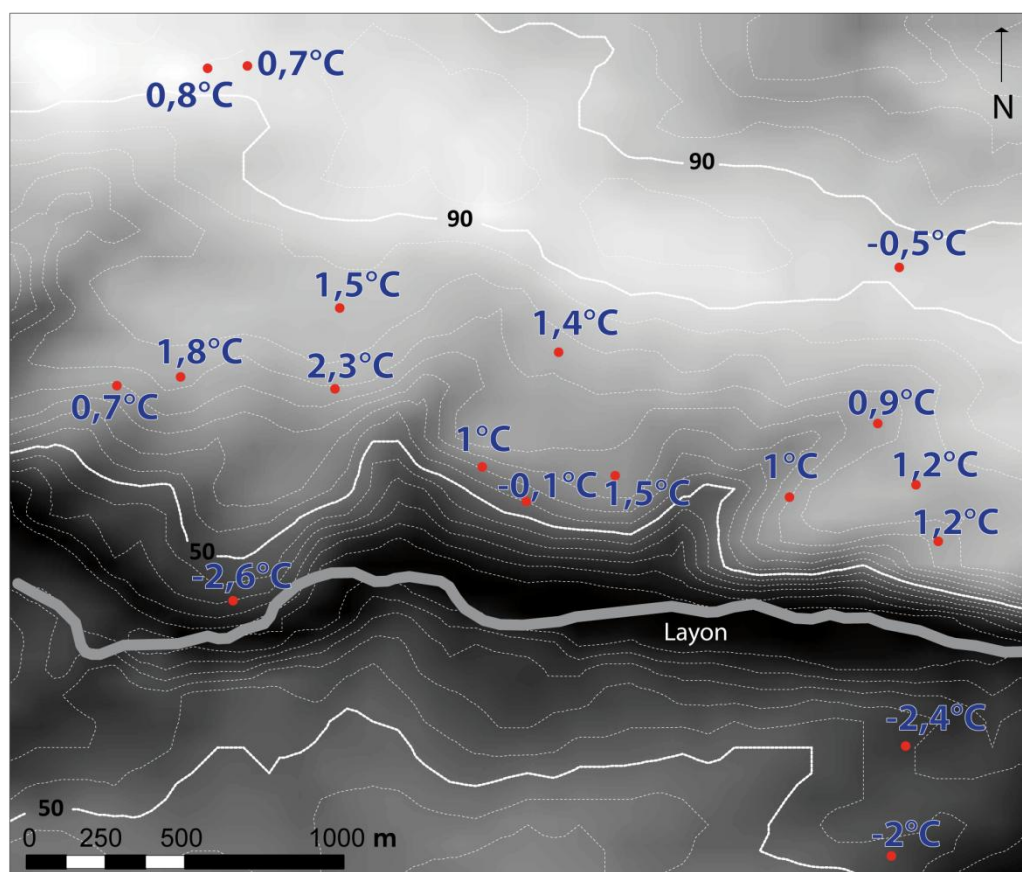
Figure 22 : Températures minimales (a) et maximales (b) moyennes mensuelles dans les Coteaux du Layon (Bonnefoy et al., 2010)

L'analyse des températures minimales et maximales moyennes sur la période phénologique de la vigne est très importante pour définir les conditions climatiques de la vigne et des caractéristiques du vin.

L'analyse des données instantanées est également importante pour étudier la variabilité spatiale des risques climatiques pour la vigne. Au printemps, au moment du débourrement de la vigne, les bourgeons sont très sensibles au refroidissement nocturne et suivant le stade de croissance, la vigne peut subir d'importants dommages si les températures minimales nocturnes sont négatives (AVC, 1991).

L'analyse des températures minimales mensuelles a montré une différence proche de 2°C entre les postes en haut et bas de coteau. Ces écarts thermiques peuvent également engendrer une forte variabilité spatiale du risque gélif. A l'échelle d'une nuit gélive, le contraste thermique est plus important. Par exemple, lors de la nuit du 20 au 21 mars 2011, la situation synoptique était marquée par des conditions anticycloniques, un ciel clair et un vent d'Est très faible. Le refroidissement nocturne, d'origine radiative, a engendré une répartition des températures minimales en fonction de la topographie et des zones abritées. Les secteurs les plus froids correspondent aux bas de coteaux ou aux cuvettes où l'air froid ne s'écoule plus et stagne. Par conséquent, les températures minimales enregistrées dans les parties basses de la vallée du Layon ont été entre -2°C et -3°C alors que sur les pentes les températures ont été positives (figure 23). L'analyse des données ¼ horaire des stations *Campbell*, « Chaumes » en bas de coteau et « Beaulieu » en haut de coteau, a mis en évidence le comportement des températures en relation avec l'humidité relative et la vitesse du vent. La température minimale a atteint -2,3°C en fin de nuit à la station de Chaumes alors qu'elle n'est pas descendue en dessous de 1°C à Beaulieu (figure 24a). A Chaumes, le refroidissement nocturne d'origine radiatif a été accentué par la vitesse du vent qui a été beaucoup plus faible qu'à Beaulieu. On peut noter une absence de vent durant toute la nuit à Chaumes alors qu'à Beaulieu, l'absence de vent est enregistrée entre 23h et 2h. On peut également observer un fort contraste au niveau du taux d'humidité relative qui est beaucoup plus important à Chaumes (figure 24b et c). La proximité du Layon ainsi que l'effet d'abri de ce secteur favorisent la saturation de l'air (figure 24a).

Après cet épisode gélif, aucun dommage sur la vigne n'a été observé car les bourgeons n'avaient pas encore commencé à débourrer. Le 30 mars 2009, une nuit radiative a engendré des dommages sur les bourgeons qui commençaient à débourrer dans le bas des coteaux du Layon au niveau de la station Chaumes et dans les vignobles situés en bas de coteau de l'autre côté du Layon. Les températures minimales ont atteint -3°C dans ce secteur. Le reste du vignoble n'a pas subi de dommage car les températures minimales ne sont pas descendues en dessous de -1°C .



Data : Terviclim

Figure 23 : Températures minimales du 21 mars 2011 enregistrées par les Tynitag dans le vignoble des Coteaux du Layon (appellation Quart de Chaumes).

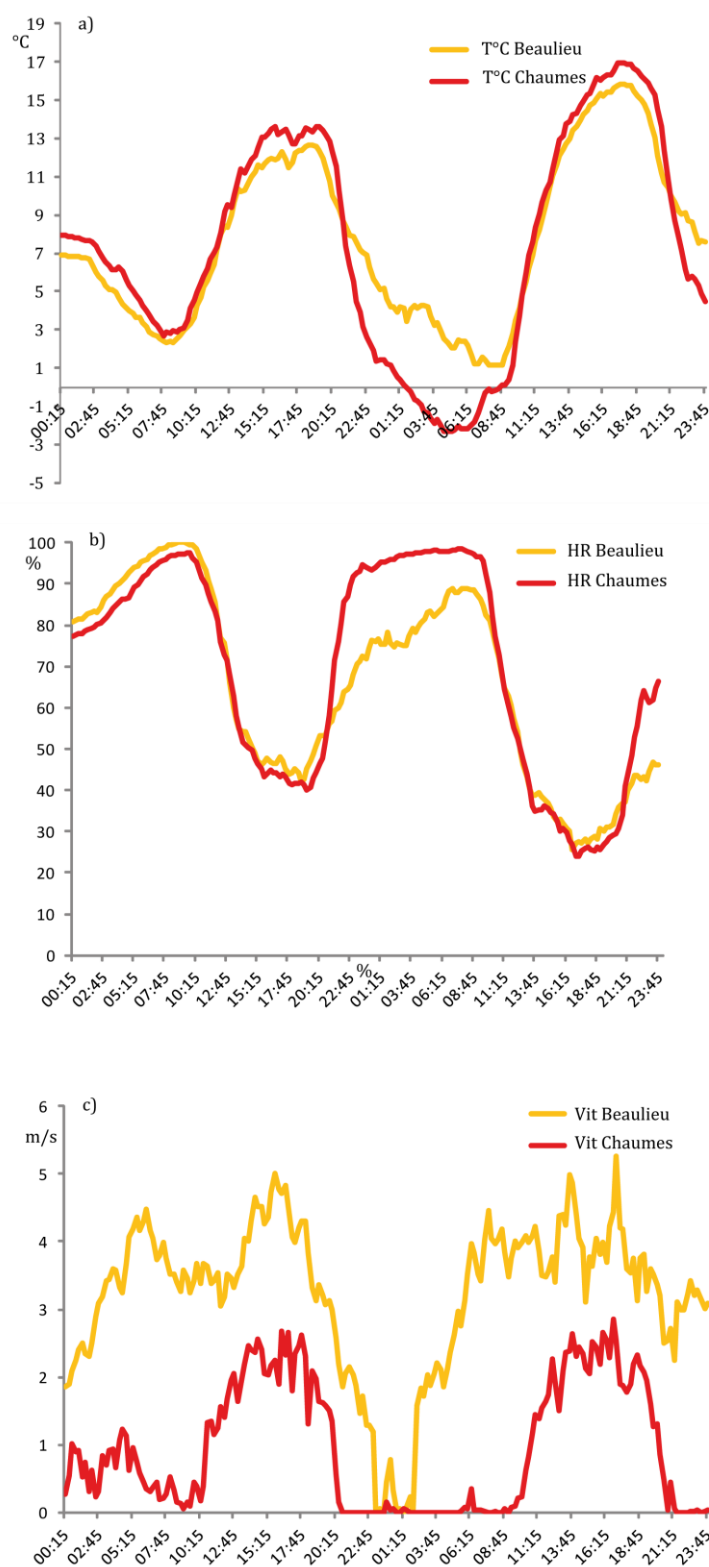


Figure 24 : Températures (a), humidité relative (b) et vitesse du vent (c) enregistrées toutes les 15 mn sur les stations « Chaumes » et « Beaulieu » la nuit du 21 mars 2011

L'analyse des températures maximales instantanées est également très importante pour la vigne notamment en été où des températures extrêmes peuvent engendrer l'échaudage des baies (Champagnol, 1984). La journée du 4 juillet 2011 a été marquée par des températures maximales supérieures à 30°C. Les températures maximales les

plus élevées ont été enregistrées dans les secteurs abrités en bas de coteau (poste n°3), d'exposition sud ou avec un type de sol avec un albédo élevé (poste n°5) (figure 25).

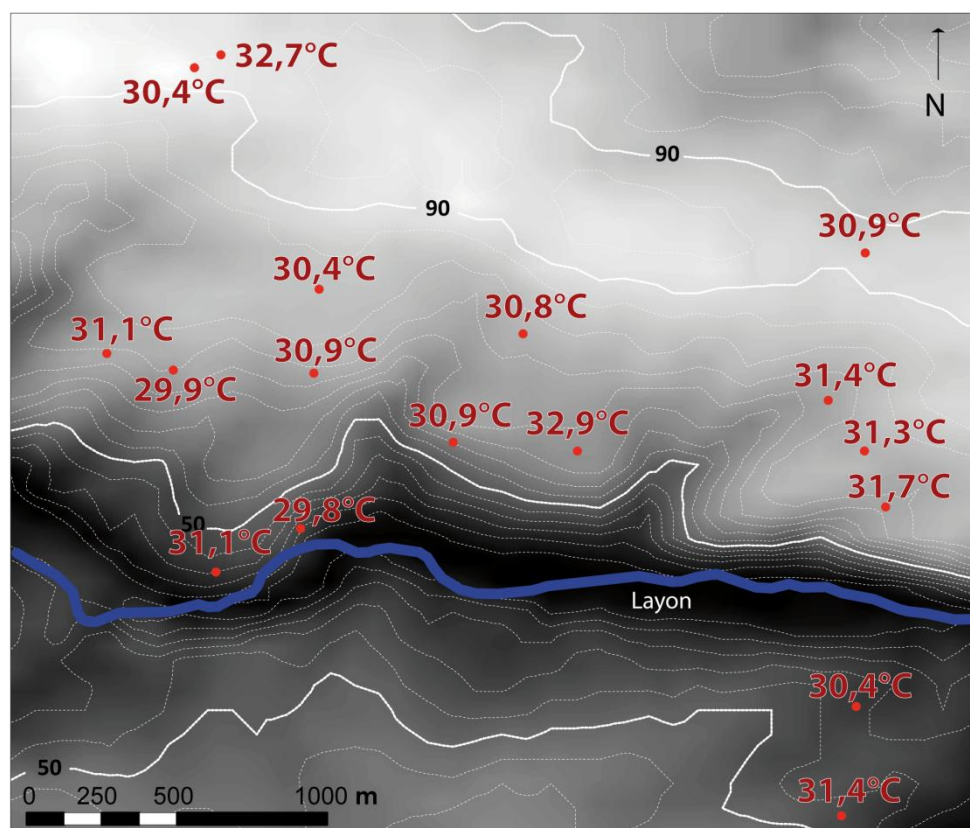


Figure 25 : Températures maximales du 4 juillet 2011 enregistrées par les Tynitag dans le vignoble des Coteaux du Layon (appellation Quart de Chaumes).

Les différences thermiques entre les stations de « *Chaumes* » et de « *Beaulieu* » ont été moins importantes que pour les températures nocturnes du 21 mars 2011. Toutefois, les écarts ont atteint +1°C au moment le plus chaud de l'après-midi (29,4°C à Beaulieu et 30,4°C à Chaumes). Le taux d'humidité relative a été similaire sur les deux postes mais la vitesse du vent a été nettement supérieure à « *Beaulieu* » qu'à « *Chaumes* ». L'opposition entre le bas de coteau abrité du poste « *Chaumes* » et le haut de coteau dégagé et exposé au Sud a engendré des différences de températures assez proches (figure 26a, b et c).

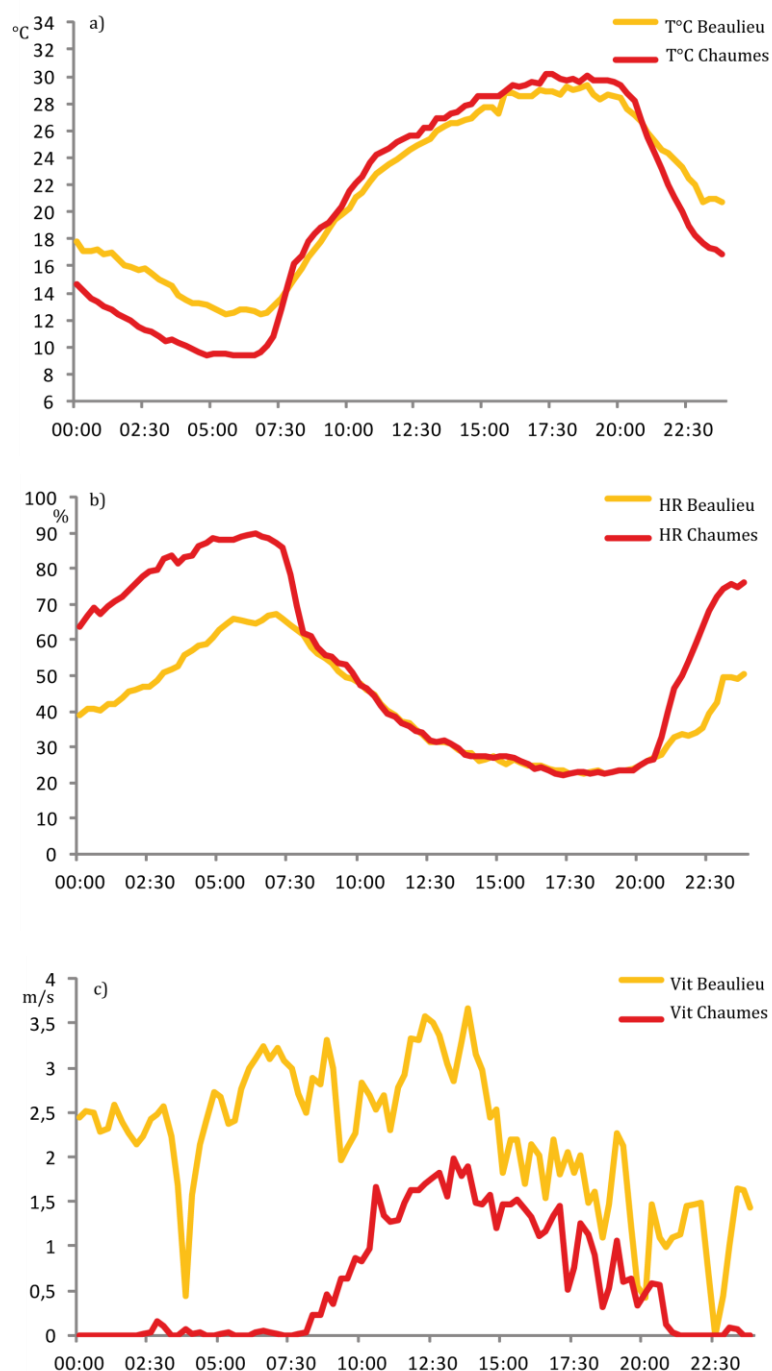


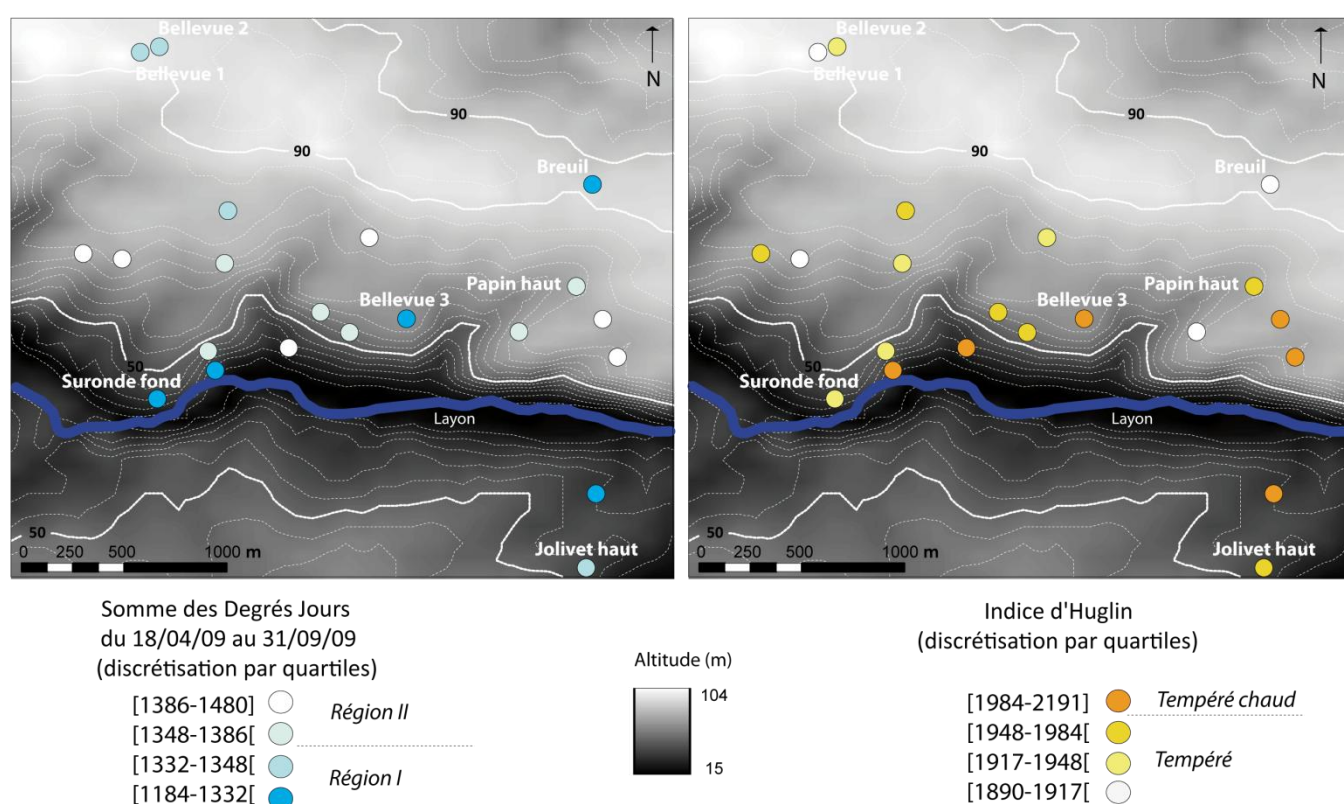
Figure 26 : Températures (a), humidité relative (b) et vitesse du vent (c) enregistrées toutes les 15 mn sur les stations « Chaumes » et « Beaulieu » le 4 juillet 2011

Les calculs du cumul des degrés/jours et de l'indice de *Huglin* n'ont été effectués que sur 20 capteurs car deux ont des données manquantes. La figure 27 montre clairement que les cumuls de degrés/jours les plus faibles sont observés en versant Nord ou en fond de vallée et haut de coteau. En revanche, les cumuls les plus élevés se trouvent en général à mi-coteau. Ainsi, le cumul des degrés jours (dj) varient de 1184 dj à 1480 dj. Ces observations laissent suggérer que celles-ci auront des conséquences sur le

déroulement du cycle phénologique de la vigne et notamment sur la date de maturité. La « ceinture chaude » de mi-coteau est en tout cas bien mise en évidence.

L'indice basé sur l'indice de *Huglin* a montré une assez forte variabilité au sein des vignobles (valeurs variant de 1890 à 2190). Les valeurs les plus faibles sont localisées en haut de coteau alors que les valeurs les plus fortes sont clairement en bas et à mi-coteau. Nous observons des indices relativement élevés en versant Nord, contrairement aux degrés jours, du fait que le calcul de l'indice de *Huglin* donne un poids plus important aux températures maximales.

D'après la classification d'*Huglin*, certains capteurs seraient classés en « climat tempéré » alors que d'autres en « climat tempéré chaud ». Une nouvelle fois cette observation montre toute la complexité du climat des Coteaux du Layon qui donne la typicité si particulière de ses vins (figure 27a et b).



Data : Terviclim

© Bonnefoy et al

Figure 27 : Cumuls des degrés jours (a) et Indice d'Huglin (b) calculés pour la période végétative de 2009 enregistrés par les Tynitag dans le vignoble des Coteaux du Layon (appellation Quart de Chaumes). (Bonnefoy et al., 2010)

Les indices bioclimatiques d'*Huglin* ou de *Winkler* ont été définis pour caractériser des régions climatiques. Dans cet exemple, ils ont été uniquement calculés pour mettre en évidence les différences thermiques liées aux caractéristiques locales et de l'influence que cela peut avoir sur la vigne. Cela montre qu'il faudrait arriver à définir des indices

bioclimatiques spécifiques aux échelles fines prenant en compte les paramètres locaux tels que la topographie ou le type de sol.

La phase d'acquisition des données agro-climatiques à l'échelle du terroir viticole (décrite ici avec l'exemple du Val de Loire) a été mise en place dans les 20 vignobles étudiés dans les programmes ANR-JC-TERVICLIM et GICC-TERADCLIM. Les résultats ont permis de mettre en évidence une importante variabilité spatiale du climat (notamment pour les températures) sur des espaces relativement restreints. Les analyses agronomiques ont montré aussi une relation entre ces différences climatiques locales et la vigne que ce soit au niveau de la phénologie ou des caractéristiques du raisin. Dans un contexte de changement climatique où les différents scénarios simulent une augmentation de 2 à 6°C à l'horizon 2100, la modélisation de la variabilité spatiale du climat à l'échelle des terroirs viticoles est un objectif primordial pour la profession viticole dans une optique d'adaptation.

2.3 Modélisation climatique adaptée aux terroirs viticoles : *Application aux vignobles de Stellenbosch (Afrique du Sud)*

Comme cela a été développé dans la partie 1.4, les méthodes de modélisation spatiale doivent suivre la même démarche que pour les analyses des données météorologiques, c'est-à-dire, prendre en compte l'influence des paramètres locaux en sachant qu'ils agissent sur les variables météorologiques à différentes échelles spatiales imbriquées. La modélisation numérique à méso-échelles par l'intermédiaire des modèles régionaux RAMS (Regional Atmospheric Modelling System) et WRF (Weather Research and Forecasting) et la modélisation géostatistique multicritères ont été/sont appliquées aux vignobles expérimentaux (de l'ANR-JC-TERVICLIM et du GICC-TERADCLIM) situés en France (Val de Loire, Champagne, Bordeaux, ...), en Espagne, au Portugal, en Amérique du Sud, en Afrique du Sud et en Nouvelle Zélande.

Les résultats issus des 2 types de modélisation sont présentés avec l'exemple de la période de maturation de la vigne en 2009 (janvier à mars) dans les vignobles de Stellenbosch en Afrique du Sud.

2.3.1 Contexte : des études scientifiques adaptées aux terroirs

Les premières simulations du climat, en relation avec la viticulture, ont été effectuées dans les vignobles sud-africains. Contrairement à l'exemple précédent (Val de Loire), où l'augmentation moyenne de la température de 1°C est actuellement bénéfique pour la vigne ; les vignobles sud-africains sont soumis à un climat « extrême » pour la culture de la vigne. En effet, l'augmentation des températures moyennes lors des 30 dernières années a engendré des difficultés pour la culture de la vigne et les viticulteurs doivent déjà s'adapter notamment en plantant la vigne plus en altitude (Hunter et Bonnardot, 2011).

Par conséquent, l'Afrique du Sud a depuis le début des années 90 mis en place des projets de recherche regroupant des spécialistes de différentes disciplines (climatologie, géologie, pédologie, physiologie, œnologie, analyse sensorielle, géographie, agronomie) afin de définir et de mettre en valeur ses différents terroirs viticoles. Le district viticole de Stellenbosch (près du Cap) et ses environs ont fait l'objet des premières études sur les terroirs bénéficiant d'un climat méditerranéen avec des variations spatiales notables dues à la complexité topographique et la proximité de l'océan, diversifiant ainsi les environnements pour la viticulture. Un réseau de stations météorologiques automatiques associé à des parcelles de différents cépages a été établi dans la région depuis le début des années 1990 afin de suivre l'interaction entre la vigne et son environnement. Ce réseau a été utilisé et développé (40 capteurs *Tinytag*) dans le cadre des programmes WW13/12 (financé par Winetech et dirigé par V. Carey) et l'ANR-JC-TERVICLIM, en se plaçant dans un contexte de changement climatique et venant ainsi compléter les études préliminaires sur le changement climatique et l'impact sur la viticulture (Bonnardot et Carey, 2007). De manière similaire aux autres sites expérimentaux, les capteurs ont été disposés en fonction des facteurs locaux (altitude, pente, exposition, distance à l'océan, ...) (figure 28).

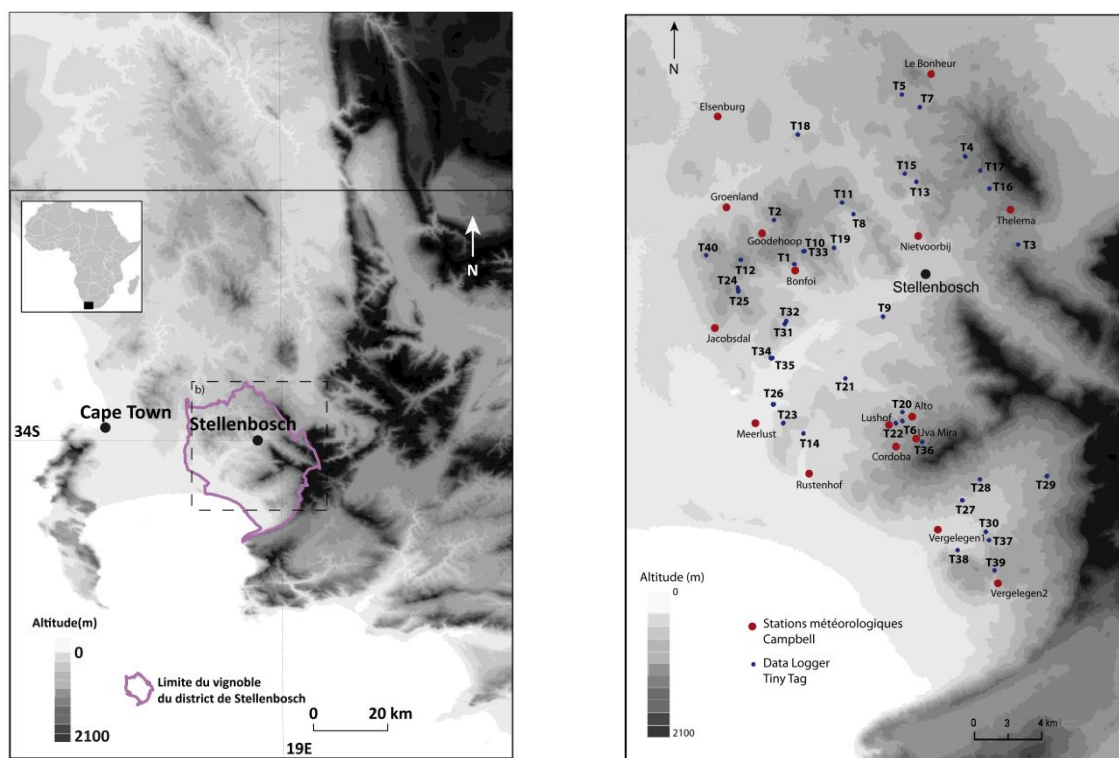
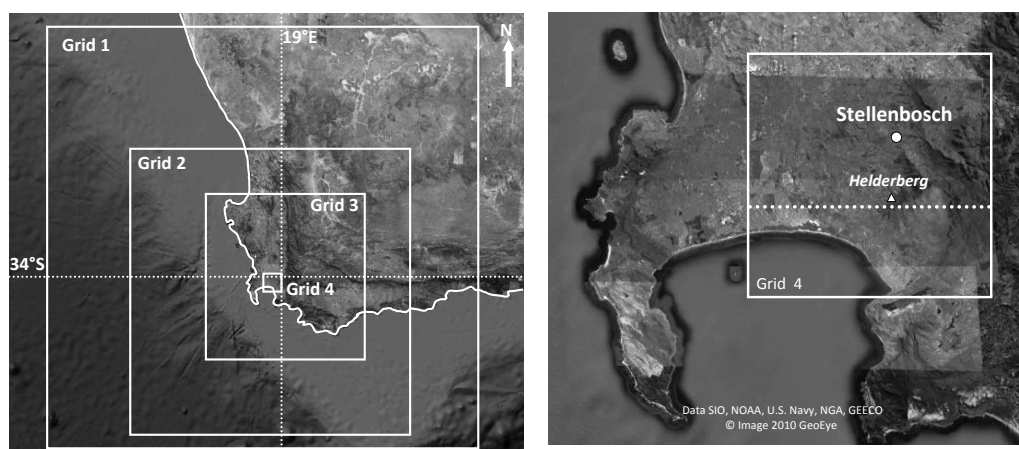


Figure 28 : Localisation du vignoble (a) et des instruments de mesures (b) dans le district de Stellenbosch. (Bonnardot et al., 2012)

Pour les simulations climatiques à méso-échelles, le choix de l'utilisation du modèle Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) a fait suite à des résultats intéressants concernant des modélisations à imbrications d'échelle multiples effectuées sur le vignoble de la province occidentale du Cap en Afrique du Sud. Située dans une région à topographie complexe et proche de la mer, la région offrait un très bon cadre d'étude pour étudier les circulations atmosphériques locales. Les simulations ont montré l'intérêt et l'apport de grilles à hautes résolutions (200 m) fournissant des paramètres météorologiques pertinents pour la viticulture. Des tests statistiques ont été effectués afin de voir quelle résolution était la plus pertinente. Pour chaque cas, les simulations à 1 km et 200 m de résolution étaient supérieures à celles à 5 km de résolution et reproduisaient mieux les circulations locales (brise de mer/brise de pente) en raison d'une meilleure représentation des états de surface (sol, végétation et topographie) (Bonnardot et Cautenet, 2009).

La modélisation RAMS a utilisé quatre grilles imbriquées. La grille principale, de 25km de résolution, correspond au domaine de modélisation consacré aux circulations synoptiques. (29°S à 38°S et à 13°E à 24°E). Les deuxièmes et troisièmes grilles sont aux échelles intermédiaires avec des résolutions horizontales de 5km et 1 km. La grille 4 est à haute résolution (200 m) et correspond au secteur viticole de Stellenbosch (figure 29).



| | Dimensions (km) | Horizontal resolution | Nb of cells | Grid points |
|--------|--------------------|--------------------------|-------------|----------------|
| Grid 1 | 1025 × 1025 | 25 km | 41 × 41 | 1681 |
| Grid 2 | 505 × 505 | 5 km | 101 × 101 | 10201 |
| Grid 3 | 281 × 301 | 1 km | 281 × 301 | 84581 |
| Grid 4 | 40,2 × 40,2 | 200 m | 201 × 201 | 40401 |

Figure 29 : Caractéristiques des grilles imbriquées pour la modélisation RAMS (Bonnardot et al., 2012).

2.3.2 Résultats des modélisations climatiques

2.3.2.1 Des forts contrastes thermiques nocturnes

Les températures minimales enregistrées par 40 capteurs situés dans les vignes du district de Stellenbosch ont été étudiées sous différentes conditions météorologiques au cours de la période de maturation du raisin (janvier-mars) en 2009. La différence maximale entre les sites est de 3,2°C en moyenne pour la période étudiée alors qu'elle atteint 14°C en situations nocturnes radiatives (une différence de 1°C à 2°C par km et 3°C par élévation de 100 m environ). Les postes les plus frais sont situées dans les secteurs où la pente est faible (figure 30). Les vignobles sont soumis à de forts contrastes thermiques qui peuvent engendrer des conséquences importantes pour la maturation des raisins (Tonietto et Carbonneau, 2004 ; Hunter et Bonnardot, 2011).

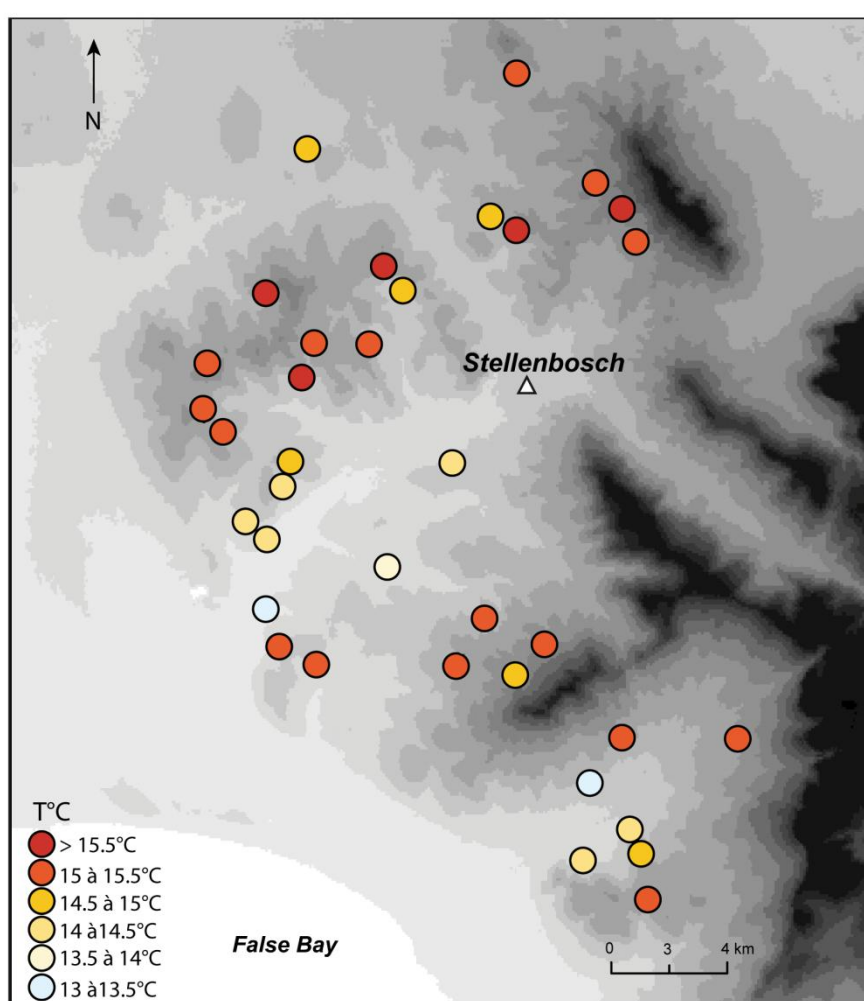


Figure 30 : Températures minimales moyennes de janvier à mars 2009 enregistrées par les Tynitags dans le vignoble de Stellenbosch. (Bonnardot et al., 2012)

La figure 31 montre la fréquence des classes de températures minimales au cours de la période de janvier/mars 2009. Selon la littérature, les conditions optimales pour la couleur et les arômes des raisins sont des températures nocturnes entre 10°C et 15°C

(Hunter et Bonnardot, 2011). Cette fourchette optimale varie de 55% (ex : T13) à plus de 80% (ex : T27). Les situations avec une température minimale trop élevée ($>20^{\circ}\text{C}$) varie de 1% (ex : T21) à plus de 10% (ex : T16). Les postes de fond de vallée (ex : T21, T27 et T28) ont obtenu un pourcentage proche 10% des températures minimales en-dessous de 10°C (Bonnardot et al, 2012).

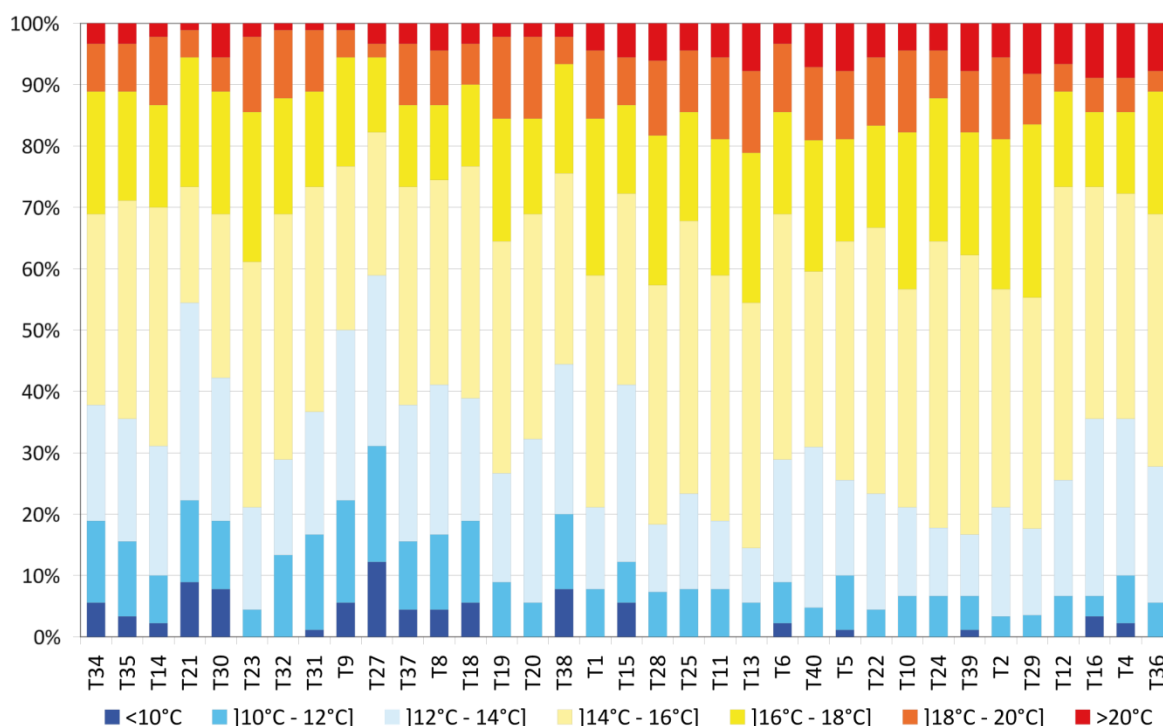


Figure 31 : Fréquence des températures minimales moyennes de janvier à mars 2009.
(Bonnardot et al, 2012)

2.3.2.2 Modélisation numérique méso-échelles

Les simulations numériques utilisant le modèle atmosphérique méso-échelle RAMS ont été effectuées afin de générer des champs de températures minimales à 200 m de résolution. Les données des 16 stations météorologiques automatiques ont été utilisées pour valider les résultats.

Les processus physiques au niveau des basses couches de l'atmosphère, provoquant les variations thermiques dans les vignobles exposés dans le paragraphe précédent, ont été étudiés pour la nuit du 5 mars 2009. Les conditions atmosphériques de cette nuit ont été très favorables (anticyclonique avec ciel clair et vent zonal très faible) à l'établissement d'inversions thermiques et de courants locaux de type catabatiques. L'accumulation d'air froid a été favorisée dans les secteurs où la pente est très faible (ex : fonds de vallée et cuvettes). Comme cela est montré sur la figure 32a, les températures modélisées les plus basses sont situées dans la vallée de l'Eerste River et dans le bassin de l'Helderberg. Au niveau de la vallée de l'Eerste River, l'inversion thermique représente une couche verticale d'environ 500m (Fig 32b). Des mesures verticales de la température ont été réalisées avec un ballon gonflé à l'hélium. Les

résultats ont montré la présence une stratification thermique mais les mesures n'ont pas été réalisées suffisamment en altitude pour observer la limite d'inversion. Prochainement, des campagnes de mesures avec un Sodar (photographie 2) seront réalisées en collaboration avec le Centre de Recherches Atmosphériques de l'Université de Christchurch (Nouvelle Zélande).

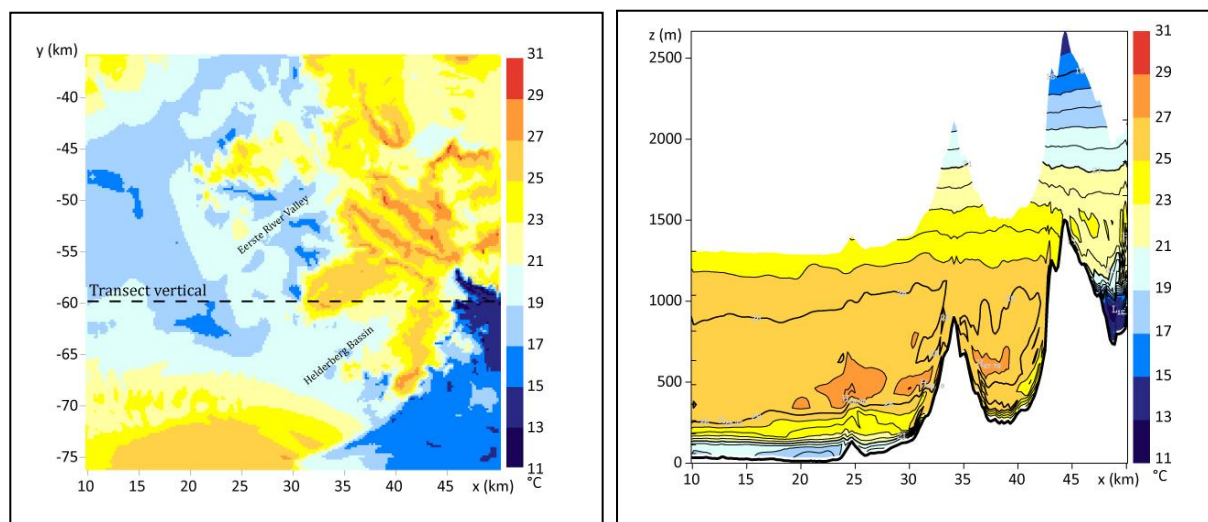


Figure 32 : Températures modélisées à 200m de résolution : représentations horizontale ($z=24m$) et transect vertical Ouest-Est (b) (05 mars 2009 à 06h00). (Bonnardot et al., 2011)



Photographie 2 : Utilisation d'un Sodar pour analyser la stratification verticale de l'atmosphère : exemple des vignobles de la région de Marlborough (Nouvelle-Zélande).

Les comparaisons entre les données modélisées et observées à 2m, par les 16 stations, ont montré que le modèle a sous-estimé les températures en moyenne de 2°C. Par exemple, la figure 33a et b, montre que la modélisation représente bien l'évolution de la température durant la nuit mais avec un biais.

Ces écarts sont dus en grande partie à la résolution de 200 m. Vu la très forte variabilité spatiale des données observées sur des distances très courtes, les différences thermiques à l'intérieur de la maille de 200 m sont certainement très importantes.

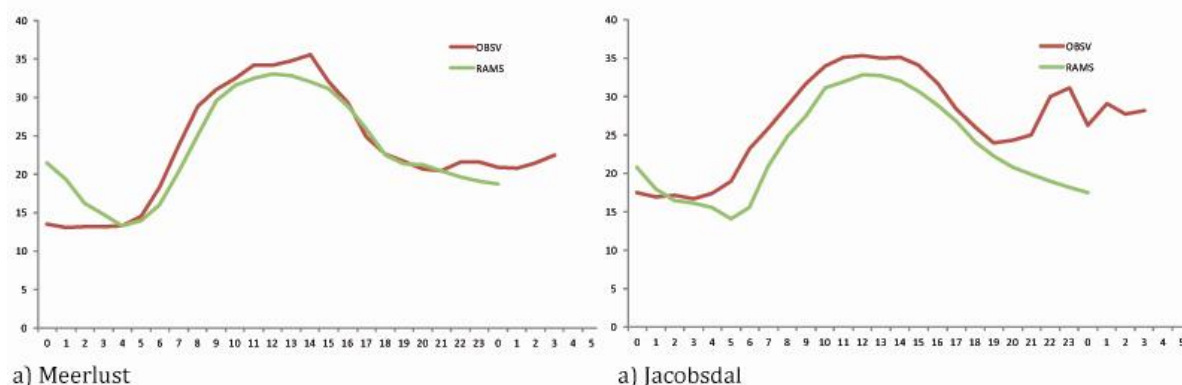


Figure 33 : Comparaison entre les données thermiques simulées à 2m (RAMS et WRF) et les données observées des stations de Jabobsdal (a) et de Meerlust (b)

2.3.2.3 Approche géostatistique

La modélisation statistique multicritères (prenant en compte les facteurs géographiques et topographiques) a été appliquée également pour la période janvier/mars 2009 (période de maturation de la vigne) et la nuit du 5 mars 2009. Les données de température des 40 *data loggers* ont servi à produire les champs de température minimale à une échelle de 90 m. Le modèle a analysé la relation entre les données thermiques et l'altitude et la pente suivant une régression multiple pas à pas ($R^2 = 0,52$; 50% de résidus entre $-0,35^\circ\text{C}$ et $0,41^\circ\text{C}$). Les coefficients de corrélation de ces 2 facteurs (respectivement 0,38 et 0,46) ont montré une contribution relativement proche. Les relations suivantes ont été définies :

- plus la pente est forte et plus les températures minimales sont élevées ;
- plus l'altitude est élevée et plus la température minimale est élevée.

Ces résultats ont montré l'importance des phénomènes thermiques d'inversion et du drainage de l'air froid suivant la topographie (Geiger, 1966 ; Mahrt, 1986 ; Fallot, 1992).

Toutefois, la moitié de la variabilité des températures minimales n'a pas pu être expliquée par le modèle. Ceci est lié :

- à la résolution du point de grille de 90 m qui ne correspond pas exactement à la position du capteur ;
- aux différents types de situations atmosphériques rencontrées durant la période janvier/mars 2009. En effet, l'importante variabilité spatiale des températures minimales est observée lorsque les conditions atmosphériques sont stables (ciel clair et vent faible). Un temps perturbé limite très fortement ces écarts de températures entre les différents points (Bonnardot *et al.*, 2012) ;

- à d'autres facteurs non utilisés ici comme la nature de l'occupation du sol, le type de sol, le vent, ...

Comme l'indique Bonnardot *et al.* (2012), l'évaluation des températures minimales a été limitée aux secteurs situées en-dessous de 500m et cela pour 2 raisons : d'une part, parce qu'il n'y a pas de vignoble au-dessus de cette altitude et par conséquent, nous n'avons pas de postes de mesures et d'autre part, parce que la modélisation atmosphérique a montré que la couche d'inversion thermique était présente dans les 500 premiers mètres au-dessus du sol.

La modélisation de la température minimale moyenne durant la période de janvier/mars 2009 a donc été réalisée avec une résolution de 90 m (figure 34a). Comme l'altitude est un facteur déterminant, la distribution spatiale des températures minimales reflète les variations d'altitude. La figure 34b montre la simulation des températures minimales moyennes de janvier/mars avec des seuils de 2°C correspondant aux classes utilisées pour définir les conditions optimales pour la maturité des raisins.

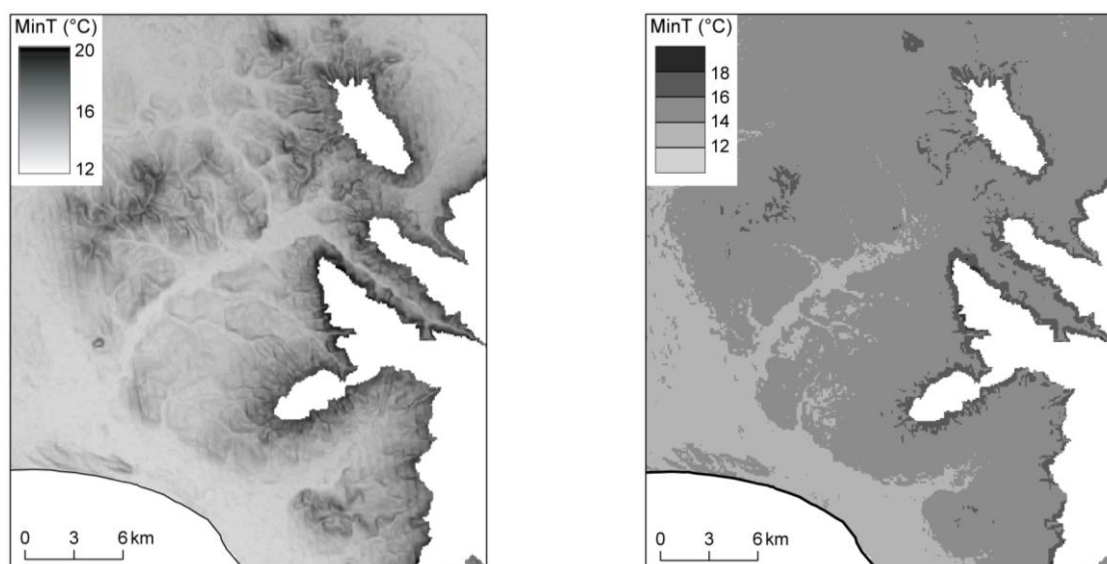


Figure 34 : Modélisation multicritères des températures minimales moyennes dans le district viticole de Stellenbosch (a) et discrétisation suivant les températures utilisées pour la maturité de la vigne (b) (réalisation M. Madelin).

Comme pour la modélisation atmosphérique à méso-échelles les champs de températures minimales de la nuit du 5 mars 2009 ont été simulés par régressions multiples. Le facteur principal expliquant la variabilité spatiale des températures est l'altitude puis dans une moindre mesure, la pente, la latitude et la longitude. Le modèle a expliqué 94% de la variance (figure 35a et b).

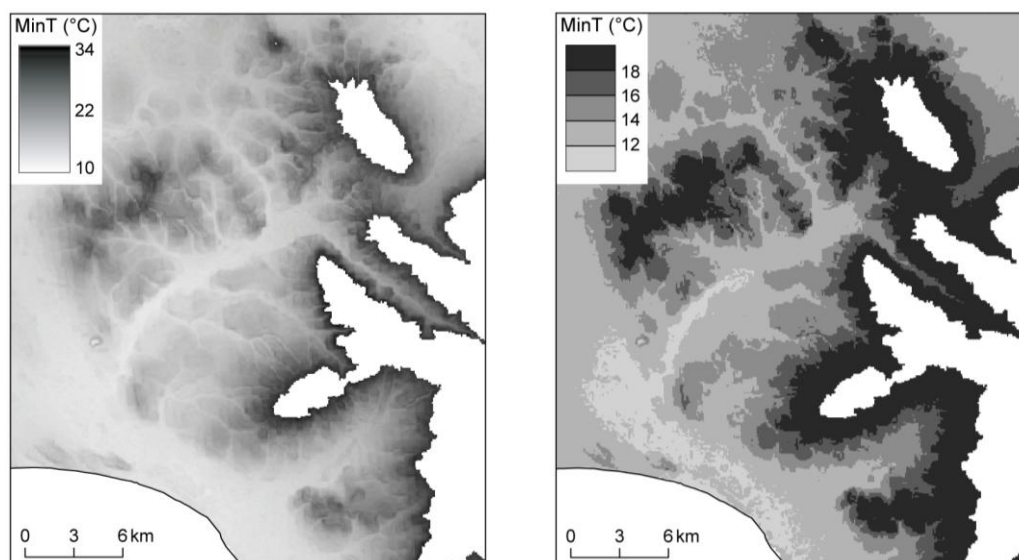


Figure 35 : Modélisation multicritères des températures minimales dans le district viticole de Stellenbosch pour la nuit du 5 mars 2009 (a) avec une classification tous les 2°C (b) (réalisation M. Madelin).

Les sorties de modèles statistiques et atmosphériques ont des résultats assez similaires notamment en mettant en évidence l'impact de la topographie sur la répartition des températures. La « fourchette » des températures minimales qui varient en fonction des facteurs géographiques mais aussi des conditions synoptiques abouti à diverses conditions thermiques nocturnes dans le district viticole avec un impact possible sur le métabolisme de la vigne. Les secteurs avec des conditions optimales pour le développement et la maintenance de la couleur et des arômes sont identifiés en moyenne pour la période de trois mois et pour des conditions météorologiques particulières.

Les premiers résultats de la modélisation numérique méso-échelle et géostatistique à l'échelle des terroirs viticoles sont satisfaisants. Les deux méthodes ont été testées dans les vignobles d'Afrique du Sud (résolution de 200 m pour la modélisation physique et résolution de 50 m dans une grille plus petite pour la modélisation statistique) et les validations par l'intermédiaire des réseaux de stations météorologiques (15 stations météorologiques type *Campbell* et 40 capteurs de températures) ont été significatives (publication en cours : Bonnardot, Cautenet, Madelin, Carey et Quénol, 2012).

Ces premiers résultats appuient notre démarche quant à une nécessaire combinaison des deux méthodes de modélisation spatiale. Le travail qui sera réalisé pour la mise en relation entre les 2 types de modélisation abordera principalement la question du transfert d'échelles. La collaboration avec le laboratoire de recherches atmosphériques de l'Université de Canterbury à Christchurch (Nouvelle-Zélande) nous permet actuellement d'effectuer des simulations pour des périodes communes, dans les vignobles sud-africains, afin de comparer la capacité des modèles RAMS et WRF pour faire des simulations climatiques à l'échelle des terroirs (publications en cours).

Après l'élaboration de ces modèles adaptés aux échelles locales, la seconde étape consistera à y intégrer les scénarios du GIECC issus de différents modèles à circulations générales et régionaux.

2.4 Intégration des sorties de modèles globaux dans un modèle méso-échelles

2.4.1 Contexte

Le chapitre précédent a montré l'intérêt de l'utilisation de modèles climatiques méso-échelle pour la régionalisation de phénomènes atmosphériques avec des résolutions fines inférieures à 10 km (Castel *et al.*, 2010) jusqu'à 1 km et 200 m (Bonnardot et Cautenet, 2009). Les simulations numériques réalisées dans l'ANR-JC-TERVICLIM ont été effectuées pour différentes régions viticoles en France et dans le monde (Bonnardot *et al.*, 2010 ; Briche *et al.*, 2011).

Grace à une résolution spatiale fine obtenue avec RAMS (5 km) par rapport à ARPEGE_Climat (50 km), les hétérogénéités de surface y sont mieux représentées, on peut donc s'attendre à une meilleure adéquation entre les observations et les valeurs simulées. Avant l'intégration de différents scénarios de changement climatique du GIEC dans le modèle à méso-échelles, une phase de validation de données a été effectuée sur une période de référence (1991-2000).

2.4.2 Données et méthodes

Le modèle atmosphérique méso-échelle RAMS a été initialisé en forçant aux limites latérales avec les champs 3D issus d'ARPEGE_Climat de Météo-France à une résolution 0.5° sur un domaine correspondant à l'Europe de l'ouest (51°N-38°N ; 8°W-12°E). Les données ARPEGE-Climat utilisées sont celles générées avec la version 3 et qui ont servi dans les projets européens MERCURE et PRUDENCE (Déqué *et al.*, 2005) et dans les projets GICC-CARBOFOR et IMFREX (Déqué, 2007).

Les simulations climatiques méso-échelle ont été effectuées pour certains mois clés du cycle de la vigne (avril, juillet et août), sur la période de référence 1991-2000 et en utilisant deux grilles imbriquées : Grille 1 avec une résolution horizontale de 25 km correspondant au domaine de forçage ; Grille 2 avec une résolution horizontale de 5 km (Figure 36). Cette dernière grille à haute résolution permet une comparaison des sorties de modèle avec les données observées à une échelle plus pertinente pour les différents vignobles étudiés en Europe de l'ouest (Champagne, Val de Loire, Bordelais et Navarre).

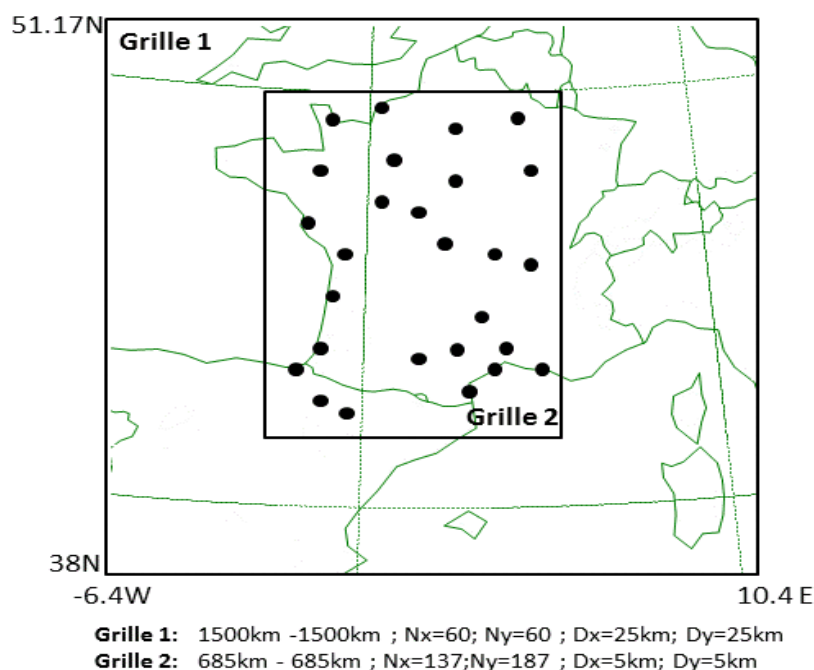


Figure 36 : Grilles imbriquées et localisation des stations météorologiques utilisées

Répartition des 34 stations utilisées pour la validation.
 Les points représentent la localisation des stations dont les données
 ont été utilisées pour la validation des simulations.

Les données journalières de température (34 stations) ont été issues du fichier européen ECA&D (Klein Tank, 2002) ; de Météo-France et du Bureau météorologique de la province de Navarre. L'intérêt s'est porté sur 3 stations situées dans les vignobles français de la Champagne (Reims), du Val de Loire (Angers) et du Bordelais (Bordeaux).

Une analyse statistique a été réalisée sur les différences entre les valeurs simulées (par RAMS et ARPEGE) et les valeurs observées de la période de référence. Etant dans une démarche de scénario climatique, les différences entre les valeurs simulées et observées journalières n'ont pas été effectuées, mais les températures moyennes, maximales et minimales moyennées sur le mois ont été analysées. La validation a donc été effectuée sur les moyennes mensuelles (Déqué, 2007).

2.4.3 Résultats : des simulations affinées par la modélisation numérique méso-échelles

Les résultats présentés, concernent les simulations des températures moyennes mensuelles pour les mois d'avril, juillet et août, ainsi que celles des températures minimales moyennées sur le mois d'avril (période de débourrement de la vigne pour évaluer les risques de gel printanier) et des températures maximales moyennées sur le mois de juillet (mois le plus chaud pour évaluer les fortes chaleurs). Seuls les résultats pour les stations de Reims, Angers, et Bordeaux sont présentés en détails.

D'après la matrice de corrélation de *Pearson* (Tableau 3), les températures moyennes mensuelles simulées par RAMS (5 km) ont été meilleures que celles simulées par ARPEGE (50 km), notamment en avril et août.

Tableau 3: Matrices de corrélation de Pearson ($p < 0,0001$) entre les températures moyennes mensuelles simulées par RAMS (5 km) ou par ARPEGE (~ 50 km) et les températures moyennes mensuelles observées pour 34 stations et 3 mois sur la période de référence (1991-2000).

| | Avril | | | Juillet | | | Août | | |
|--------|--------|--------------|--------------|---------|--------------|--------------|--------|--------------|--------------|
| | ARPEGE | RAMS | OBS. | ARPEGE | RAMS | OBS. | ARPEGE | RAMS | OBS. |
| ARPEGE | 1 | 0,796 | 0,828 | 1 | 0,781 | 0,892 | 1 | 0,760 | 0,840 |
| RAMS | 0,796 | 1 | 0,926 | 0,781 | 1 | 0,904 | 0,760 | 1 | 0,923 |
| OBS | 0,828 | 0,926 | 1 | 0,892 | 0,904 | 1 | 0,840 | 0,923 | 1 |

Les différences entre les températures moyennes mensuelles (avril, juillet et août) simulées par les deux modèles et les températures ont été observées pour 34 stations permettent d'avoir une vue générale des simulations (figure 37). Les écarts moyens varient de -2,1 à +2,1°C avec RAMS (axe des abscisses) et de -4,5 à +1,2°C avec ARPEGE (axe des ordonnées), selon les stations. Dans l'ensemble, les simulations des températures moyennes sont sous-estimées par les deux modèles au mois d'avril. Elles sont meilleures pour les mois de juillet et août. Les biais, surtout celui d'avril, proviennent, selon Déqué, de la physique des basses couches d'ARPEGE donc du forçage de grande échelle.

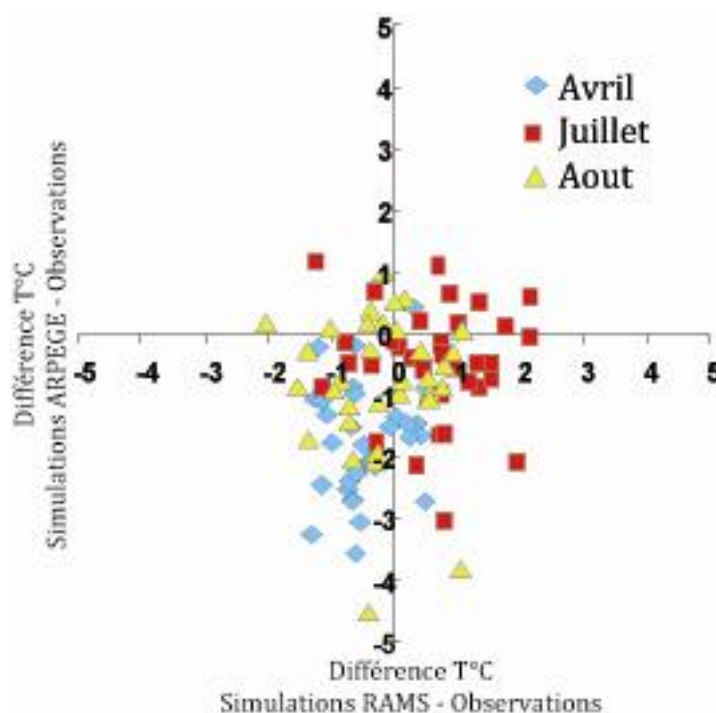


Figure 37 : Différences entre les températures moyennes mensuelles simulées par RAMS (5 km) ou par ARPEGE (~ 50 km) et les températures moyennes mensuelles observées pour 34 stations et 3 mois sur la période de référence (1991-2000).

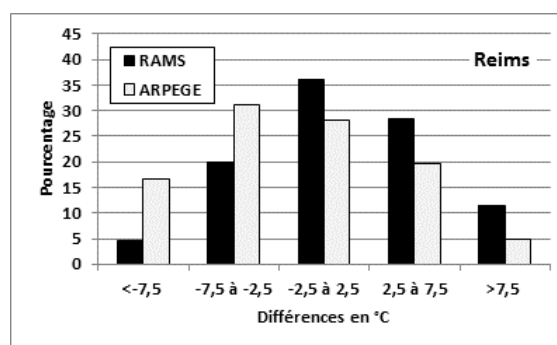
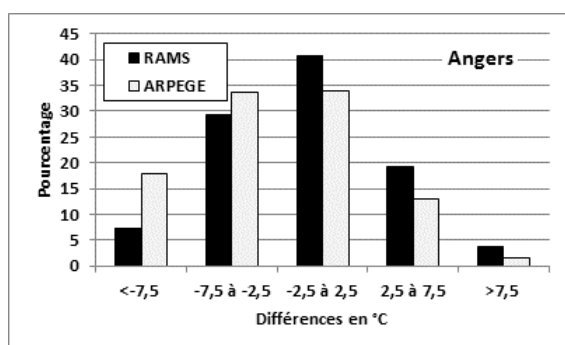
Les simulations (34 stations) des températures minimales moyennes d'avril ont été mieux reproduites par RAMS que par ARPEGE (tableau 4). Les différences entre les valeurs simulées par RAMS et les valeurs observées sont en moyenne plus réduites (de -0,7°C à Bordeaux à +1,2°C à Reims) que les différences entre les valeurs simulées par ARPEGE et les valeurs observées (de -1,8°C à Reims à -3,5°C à Bordeaux) (tableau 5). ARPEGE a sous-estimé plus fortement les valeurs minimales du mois d'avril que RAMS qui a fourni des valeurs plus proches des observations avec cependant des différences spatiales, les sous-estimant à Bordeaux et Angers et les surestimant à Reims. Par ailleurs, RAMS a sous-estimé les valeurs moins fréquemment qu'ARPEGE (figure 38). Le pourcentage avec des écarts réduits (entre -2,5 et 2,5°C) est toujours plus élevé avec RAMS quelles que soient les 3 stations.

Tableau 4 : Statistiques descriptives sur les moyennes des températures minimales du mois d'avril (1991-2000) simulées (par ARPEGE et RAMS) et observées dans 34 stations. Matrice de corrélation Pearson ($p < 0,0001$).

| Statistiques descriptives | | | | | Matrice de corrélation (Pearson) | | |
|---------------------------|---------|---------|------------|------------|----------------------------------|------|-------------|
| Variable | Minimum | Maximum | Moyenne | Ecart-type | ARPEGE | RAMS | OBS. |
| ARPEGE | 1,7 | 11,2 | 4,6 | 2,6 | 1 | 0,70 | 0,67 |
| RAMS | 4,1 | 9,5 | 6,2 | 1,5 | 0,70 | 1 | 0,70 |
| OBS. | -0,3 | 10,0 | 6,2 | 1,9 | 0,67 | 0,70 | 1 |

Tableau 5 : Statistiques descriptives sur les différences entre les valeurs simulées par RAMS (5 km) ou par ARPEGE (50 km) et les valeurs observées dans 3 stations viticoles françaises (températures minimales d'avril ; période 1991-2000 ; $n=300$).

| TN avril | Différences (°C) simulation RAMS - Observation | | | Différences (°C) simulation ARPEGE - Observation | | |
|------------------|---|-------------|------------|---|-------------|-------------|
| | Bordeaux | Angers | Reims | Bordeaux | Angers | Reims |
| 1er Quartile | -4,1 | -3,9 | -2,3 | -7,7 | -6,3 | -6,0 |
| 3ème Quartile | 2,6 | 2,3 | 5,1 | 1,0 | 0,6 | 2,4 |
| Moyenne | -0,7 | -0,8 | 1,2 | -3,5 | -2,7 | -1,8 |
| Variance (n-1) | 22,9 | 21,3 | 28,7 | 29,9 | 24,1 | 32,4 |
| Ecart-type (n-1) | 4,8 | 4,6 | 5,4 | 5,5 | 4,9 | 5,7 |



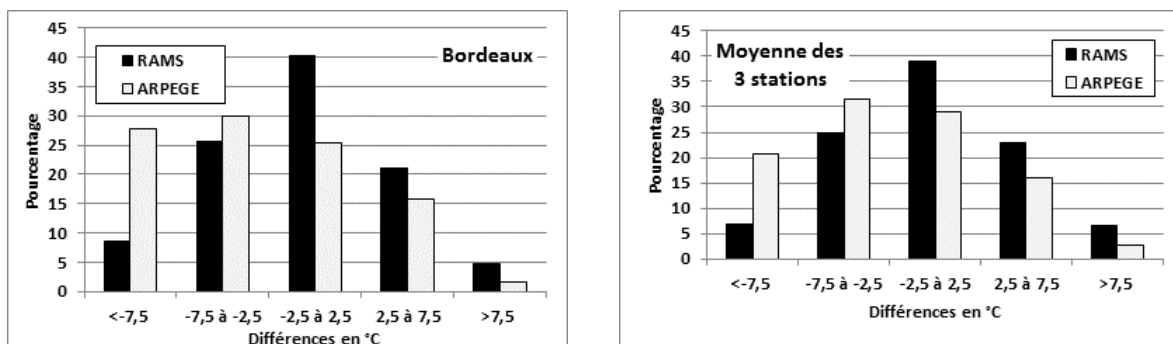


Figure 38 : Fréquence des biais sur les températures minimales d'avril (différences entre les valeurs simulées par RAMS ou ARPEGE et les valeurs observées) pour 3 stations viticoles françaises et en moyenne pour les 3 stations. Période 1991-2000.

Les simulations des températures maximales moyennes de juillet ont été également mieux reproduites par RAMS que par ARPEGE (tableau 6). En analysant les différences entre les valeurs simulées et observées, les températures maximales moyennes de juillet ont été surestimées par les deux modèles pour les 3 stations (tableau 7). Les valeurs simulées par RAMS ont été cependant meilleures (de 0,5°C à 1,5°C respectivement à Angers et Reims) que celles simulées par ARPEGE (de 1,3°C à 3,8°C respectivement à Bordeaux et Angers).

Tableau 6 : Statistiques descriptives sur les moyennes de températures maximales du mois de juillet (1991-2000) simulées (par ARPEGE et RAMS) et observées dans 34 stations. Matrice de corrélation de Pearson ($p < 0,0001$).

| Statistiques descriptives | | | | | Matrice de corrélation (Pearson) | | |
|---------------------------|---------|---------|-------------|------------|----------------------------------|------|-------------|
| Variable | Minimum | Maximum | Moyenne | Ecart-type | ARPEGE | RAMS | OBS. |
| ARPEGE | 15.8 | 35.5 | 26.5 | 3.9 | 1 | 0.78 | 0.82 |
| RAMS | 16.2 | 32.4 | 26.1 | 2.9 | 0.78 | 1 | 0.85 |
| OBS. | 19.1 | 31.8 | 26.0 | 2.7 | 0.82 | 0.85 | 1 |

Tableau 7 : Statistiques descriptives sur les différences entre les valeurs simulées par RAMS (5 km) ou par ARPEGE (50 km) et les valeurs observées dans 3 stations viticoles françaises (températures maximales de juillet ; période 1991-2000 ; $n=300$).

| TX juillet | Différences (°C) simulation RAMS - Observation | | | Différences (°C) simulation ARPEGE - Observation | | |
|------------------|---|------------|------------|---|------------|------------|
| | Bordeaux | Angers | Reims | Bordeaux | Angers | Reims |
| 1er Quartile | -2,7 | -2,6 | -2,2 | -2,4 | -0,6 | -2,4 |
| 3ème Quartile | 4,8 | 3,7 | 5,2 | 5,2 | 7,9 | 5,9 |
| Moyenne | 0,9 | 0,5 | 1,5 | 1,3 | 3,8 | 1,6 |
| Variance (n-1) | 27,4 | 22,9 | 28,7 | 33,2 | 36,5 | 33,5 |
| Ecart-type (n-1) | 5,2 | 4,8 | 5,4 | 5,8 | 6,0 | 5,8 |

Les différences spatiales sont bien visibles sur les distributions par classes (figure 39). Les écarts supérieurs à 2,5°C ont été par exemple nettement plus fréquents à Angers avec ARPEGE. La distribution normale sur les valeurs simulées par RAMS a montré que RAMS corrige assez bien ce biais. Le pourcentage avec des écarts réduits (entre -2,5 et 2,5°C) est toujours plus élevé avec RAMS quelles que soient les 3 stations.

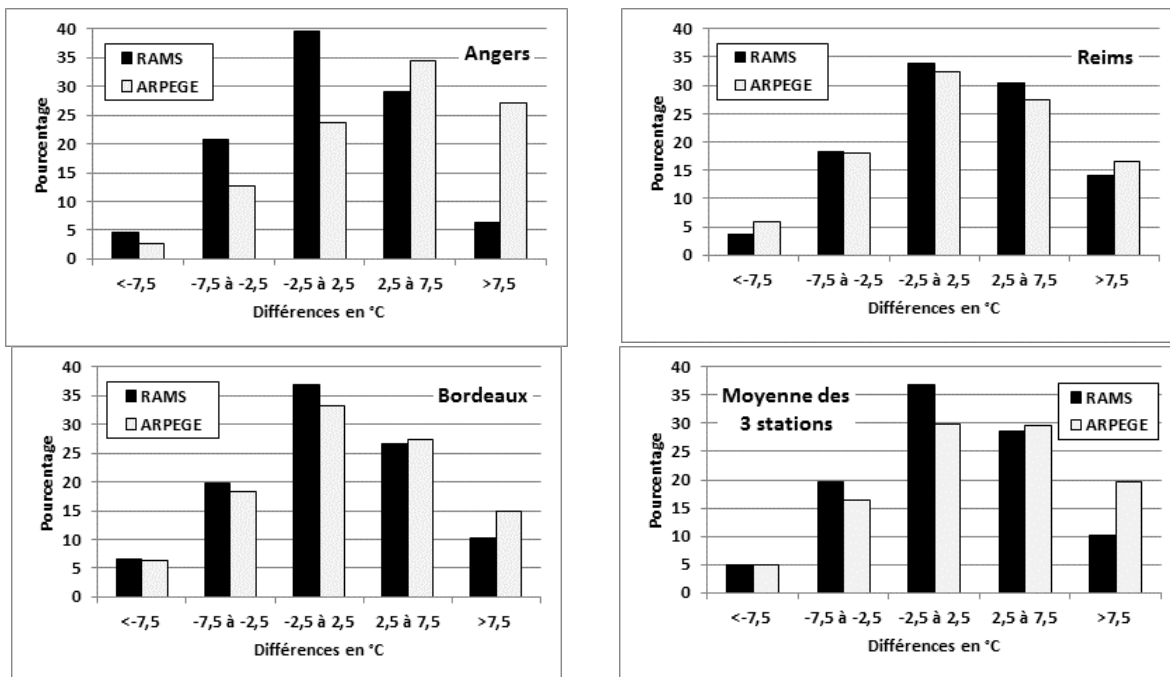


Figure 39 : Fréquence des biais sur les températures maximales de juillet (différences entre les valeurs simulées par RAMS ou ARPEGE et les valeurs observées) pour 3 stations viticoles françaises et en moyenne pour les 3 stations. Période 1991-2000.

Les séries journalières produites par les modèles ARPEGE-Climat et RAMS forcé par ARPEGE-Climat n'ont pas eu forcément la même distribution statistique que les séries journalières observées mais, malgré des différences spatiales, les modèles ont reproduit plus ou moins correctement les valeurs mensuelles minimales, maximales ou moyennes. Les résultats ont montré l'apport et la pertinence de la résolution 5 km par rapport aux sorties de modèle global ARPEGE-Climat qui, vu son échelle, a eu des résultats « honorables » comparés aux observations, mais insuffisantes pour les besoins des viticulteurs pour lesquels une échelle très fine est requise.

Les biais sont dus à l'échelle de comparaison entre des données en points de grille de résolutions différentes et des données stationnelles. Cependant les résultats ont montré que le modèle méso-échelle a réduit aussi bien les biais froids sur les moyennes des minimales d'avril que les biais chauds sur les moyennes des maximales d'août ce qui peut permettre une meilleure évaluation des risques de gel printanier et de fortes chaleurs estivales.

3. Perspectives et projet de recherche

Les méthodes d'observation et de modélisation spatiale du climat adaptées aux échelles fines exposées ci-dessus ont été développées grâce à la mise en place d'une équipe pluridisciplinaire et internationale. Dans le domaine viticole, les programmes ANR-TERVICLIM et GICC-TERADCLIM (ainsi que les divers programmes bilatéraux *ECOS-SUD*⁶ avec le Chili et *l'International Mobility Fund* avec la Nouvelle-Zélande) ont permis, d'une part de mettre en place un réseau de stations et de capteurs météorologiques à l'échelle de plusieurs terroirs viticoles répartis dans la plupart des régions viticoles mondiales et d'autre part, de développer une méthodologie de modélisation climatique adaptée aux échelles fines combinant le savoir-faire des modélisateurs physiciens et géographes. Cette équipe d'une cinquantaine de personnes (13 nationalités différentes), est composée de géographes-climatologues, d'agronomes, de physiciens de l'atmosphère, de modélisateurs, d'œnologues et de professionnels viticoles (ex : viticulteurs, coopératives, syndicats viticoles, consultants, ...). Les résultats ont montré que l'analyse et la modélisation du climat aux échelles fines permettaient de mettre en évidence une forte variabilité spatiale et temporelle du climat sur des espaces restreints.

L'analyse de ces contrastes climatiques locaux, observés avec le réseau de mesures et modélisés avec les méthodes numériques et géostatistiques, constitue la première étape d'une méthodologie mise en place pour l'adaptation au changement climatique. Par exemple, en viticulture, la typicité et la qualité des vins de terroir sont en grande partie liées à la variabilité spatiale du climat local engendrée par des facteurs comme le type de sol ou l'exposition topographique. Si le viticulteur adapte ses pratiques culturales en fonction de contrastes thermiques spatiaux de plusieurs degrés ; pourquoi ne pourrait-il pas (au moins à court et moyen terme) s'adapter à une augmentation de la température à l'horizon 2050-2100 ?

La seconde étape consiste à mettre en place une méthodologie d'adaptation au changement climatique présent et futur basée sur l'analyse et la modélisation de la variabilité spatiale du climat aux échelles fines. Pour cela, les différents scénarios du changement climatiques (GIECC, 2007) doivent être intégrés dans les modèles présentés précédemment afin de faire des simulations à court, moyen et long termes.

Pour répondre à ces objectifs, le projet s'appuie sur le savoir-faire de l'équipe pluridisciplinaire formée dans le cadre des programmes ANR-JC-TERVICLIM et GICC-TERADCLIM et les collaborations avec les concepteurs et utilisateurs des sorties de modèles globaux et régionaux du changement climatiques : Météo-France CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques), CERFACS (European Centre for Research and Advanced Training in Scientific Computation) pour la France et l'Europe ; UMI 3351 IFAECI (Institut franco-argentin d' Études sur le Climat et ses Impacts) pour

⁶ Programme « Evaluation-orientation de la COopération Scientifique pour les pays du cône Sud »

l'Amérique du Sud ; NIWA (National Institute of Water and Atmospheric Research) pour l'Océanie, ...

Mes perspectives de recherche s'inscrivent donc dans la continuité des programmes présentées précédemment et se composent de la manière suivante :

- **Développement et pérennisation des réseaux de mesures.**
- **Elaborer des scénarisations régionalisées ou localisées d'adaptation au changement climatique par l'intermédiaire d'une plateforme multi-agents.**
- **Valorisation et transfert vers les acteurs et sensibilisation aux effets du changement climatique.**
- **Au-delà la viticulture... entre monde agricole et milieu urbain.**

3.1 Modernisation et pérennisation des réseaux de mesures

La phase d'acquisition de données météorologiques en fonction des échelles spatiales imbriquées a été mise en place (en 2008 pour la plupart des sites) dans de nombreux vignobles répartis dans le monde. Cela représente **plus de 300 stations et capteurs météorologiques** (en plus des réseaux existant non installés et non gérés par l'ANR-JC-TERVICLIM). Ces réseaux de mesures représentent un outil important dans le cadre des études d'impact du changement climatique.

Un de nos objectif est de moderniser et de pérenniser ces réseaux de mesures climatiques originaux et uniques, afin d'obtenir des séries de données climatiques les plus longues possibles en application avec la viticulture. Les modèles globaux et régionaux simulent l'évolution du climat pour les 100 années à venir en essayant d'affiner de plus en plus la résolution spatiale des résultats. En garantissant un réseau de mesures climatiques à l'échelle des terroirs viticoles mondiaux pour plusieurs dizaines d'années, **cela représentera un outil inestimable pour analyser la fiabilité des modèles régionaux au fur et à mesure de leur perfectionnement et pour valider les simulations du climat futur.**

Jusqu'à maintenant, la gestion du parc instrumental ainsi que la programmation et le téléchargement des données (hormis les stations complètes qui sont munis d'un système GSM pour la transmission des données) sont effectuées par des partenaires correspondants dans chaque site. L'objectif est de développer un système de transmission (ex : Radio ou GSM) permettant d'acquérir les données des capteurs et de les transmettre directement à un ordinateur en les interrogeant à distance. Un développement électronique sera nécessaire pour cette phase.

Après avoir acquis les données en continu, le second objectif est de diffuser les données via une plateforme Web. Un travail de création et gestion de bases de données sera également nécessaire pour cette seconde phase. La plateforme Web servira

également pour diffuser les cartes agroclimatiques et les simulations du climat futur adaptées à chaque vignoble expérimental.

3.2 Intégration des scénarios du changement climatique dans les modèles « échelles fines » et adaptation au changement climatique à l'horizon 2100

Les résultats issus de la modélisation climatique adaptée à l'échelle des terroirs viticoles appuient notre démarche quant à l'utilisation de la modélisation numérique et statistique (cf. 2.3.2.2 et 2.3.2.3) notamment pour aborder la question du transfert d'échelle (*downscaling*). L'intégration des sorties ARPEGE-Climat dans Rams a mis en évidence l'apport des modèles méso-échelles en réduisant les écarts entre les données simulées et observées. Après avoir appliqué ce type de modélisation pour l'ensemble des régions viticoles étudiées (notamment avec les données ARPEGES-Climat et CERFACS pour les vignobles français), l'étape suivante consistera à intégrer les scénarios du GIECC dans ce modèle. Ce travail nous permettra à la fois de sélectionner le(s) modèle(s) du GIECC fournissant les conditions initiales à la régionalisation dynamique et aussi de mieux apprécier les incertitudes sur les projections locales.

3.2.1 Scénarios du changement climatique à l'échelle des terroirs

Concernant les simulations du changement climatiques aux échelles régionales, *« Différentes méthodes de régionalisation (ou de « downscaling »), soit les modèles régionaux du climat (MRC) ou les méthodes de downscaling statistique, ont été développées au cours des 10-15 dernières années afin de raffiner l'information climatique issue des modèles globaux du climat (MGC). Les méthodes statistiques de downscaling (SD) ont été initialement développées pour les prévisions météorologiques, et de nombreuses méthodes sont en opération à travers le monde. »* (Gachon, 2009). Bien que d'importants progrès ont été réalisés ces dernières années dans la régionalisation des données, les méthodes de descente d'échelle, *« restent un domaine sensible dans la mesure où elles conditionnent une étude plus réaliste des impacts et des actions d'adaptation »* (appel à projets GICC 2010). Les méthodes de descente d'échelle sont intensément utilisées pour développer de l'information sur le changement climatique au niveau local. En effet, même si les MRC permettent de mieux prendre en compte l'influence de la topographie et des processus physiques d'échelle régionale que les MGC, ils ne résolvent pas toujours toutes les échelles spatiales et temporelles nécessaires au besoin des études d'impact et d'adaptation. Par conséquent, le développement et l'application du SD s'avère nécessaire (X, 2010). Comme l'indique Le Treut (2010), *« une meilleure prévision des évolutions climatiques locales constitue donc un enjeu essentiel, pour lutter et nous adapter à des évolutions dont une part est inévitable.... Des études concernant la vulnérabilité des différents territoires à l'évolution des paramètres climatiques sont nécessaires, car ce sont les seules études qui permettront de placer les changements à venir, anthropiques ou naturels dans un contexte interdisciplinaire large, permettant d'associer des facteurs socio-*

économiques ou écologiques à l'étude physique du climat. La géographie en tant que discipline doit jouer un rôle clef dans cette perspective ».

Plusieurs collaborations sur l'utilisation de données régionalisées ont débuté récemment :

- avec le CERFACS afin d'utiliser les scénarios climatiques désagrégés à 8 km pour les vignobles expérimentaux français (Pagé *et al.*, 2008 ; Pagé, 2008). Ces données ont déjà été appliquées aux agro-systèmes dans le programme ANR-CLIMATOR (*Élaboration d'outils et de références pour analyser l'impact du changement climatique sur les agro-écosystèmes*), ce qui a permis notamment le développement d'outils régionalisant les scénarios issus des GCM ;
- avec Ecoclimasol© et l'UMI 3351 IFAECI afin de réaliser des simulations de l'impact du changement climatique à l'échelle des vignobles d'Amérique du Sud. Différentes modélisations régionalisées ont été effectuées dans le cadre des projets européens CLARIS puis CLARIS-LPB (A Europe South America Network for Climate Change Assessment and Impact Issues in La Plata Basin) (Boulanger *et al.*, 2011). La comparaison entre modélisation dynamique et statistique a montré le potentiel d'une approche combinée des deux approches pour étudier les possibles impacts du changement climatique sur l'Amérique du Sud (Menendez *et al.*, 2010).

3.2.2 Scénarios d'adaptation par Système Multi-agents

Après la simulation du changement climatique à l'échelle des terroirs, la phase suivante consiste à proposer des scénarios régionalisés/localisés d'adaptation pour la profession viticole. L'objectif est donc de parvenir à spécifier un environnement de modélisation systémique et intégré capable de simuler la croissance de la vigne sous des contraintes multiples (pente, exposition, nature des sols, variabilité climatique...) et d'intégrer des stratégies de production et des règles d'adaptation de ces stratégies en fonction de l'évolution de ces contraintes.

Dans cette perspective, nous utilisons la plateforme Multi-agents DAHU (Dynamique des Activités HUmaines) qui est développée par l'équipe GEOMER (UMR6554 LETG) depuis une quinzaine d'années. Cette plateforme a pour vocation de modéliser la variabilité du déroulement d'activités anthropiques sous contraintes multiples (environnementales et socio-économiques) et d'en étudier les interactions avec l'environnement. L'architecture de DAHU apporte des avancées méthodologiques significatives dans la modélisation des interactions agents/environnement. Contrairement aux approches classiques l'espace n'est pas considéré comme un élément structurant du modèle mais comme une donnée de forçage résultant d'une combinaison de phénomènes opérant à différentes échelles spatiales et temporelles (Tissot *et al.*, 2005).

Cette originalité permet d'intégrer des processus ayant des répercussions multi-échelles et d'analyser leur impact global sur le fonctionnement d'une activité donnée à partir de boucles de rétroactions. De récents développements menés dans le cadre de plusieurs programmes de recherche ont montré les capacités d'adaptation de cette plateforme à des thématiques très diversifiées (Le Tixerant *et al.*, 2009, Tillier *et al.*, 2009, Tillier *et al.*, 2010) (modélisation de la production ostréicole en situation perturbée, simulation des émissions d'effluents en bassins versants, modélisation des activités de pêche sous contraintes climatiques, juridiques et environnementales).

En partant du socle méthodologique proposé par la plateforme DAHU, les travaux associés à ce projet auront pour finalité :

(1) d'identifier des niveaux d'échelles pertinents pour restituer la dynamique de croissance de la vigne sous contraintes environnementales. Cette étape servira à spécifier différents niveaux d'abstraction dans le futur modèle facilitant la réalisation de modélisations emboîtées ;

(2) de construire un modèle d'activité viticole générique à l'échelle du terroir et d'y associer des stratégies de production qui serviront à construire un réseau d'agents réactifs ;

(3) d'identifier les règles d'adaptation des agents en fonction de l'évolution des contraintes environnementales et en particulier des changements climatiques aux échelles fines ;

(4) de formaliser un modèle de régression multiple permettant de restituer les relations entre les caractéristiques de surface des terroirs (morphologie, type d'occupation du sol) et les variables météorologiques et d'y associer des objets spatiaux. Cette analyse aura pour objectif de faciliter l'intégration des sorties de modèles climatiques à échelles fines comme contraintes de forçage des agents.

La réalisation de scénarios d'adaptation des pratiques viticoles au changement climatique par Système Multi-Agents permettra d'apporter des « réponses » à la profession viticole sur les méthodes à employer afin de mettre en place une politique raisonnée d'adaptation au changement climatique.

3.3 Valorisation et transfert vers les acteurs et sensibilisation aux effets du changement climatique

Cette partie concerne l'implication et le transfert de l'information auprès de la profession viticole et notamment des propositions d'adaptation pour leurs terroirs viticoles.

Plusieurs outils de diffusion de l'information et de sensibilisation aux changements climatiques sont prévus :

- Cartographie par Système d'Informations Géographiques (SIG) des terroirs viticoles : L'INRA d'Angers a élaboré une méthode d'étude intégrée des terroirs viticoles par

cartographie SIG. Cette cartographie prend en compte aussi bien les facteurs environnementaux (composante géologique, agropédologique, composante paysagère, ...) que les facteurs humains du terroir (ex : type de cépages, pratiques culturelles, ...). Tous ces paramètres sont intégrés dans un SIG et permettent de définir des Unités de Terroir de Base (Barbeau *et al.*, 2008). A partir des ces différentes informations, les agronomes de l'INRA ont intégrés une « couche d'informations » proposant des conseils de techniques culturales (ex : un type de cépage spécifique) en fonction des caractéristiques de l'unité de terroir. Les résultats présentés sous forme de cartes peuvent être utilisés directement à la parcelle grâce à leur précision (1/10 000^{ème}). Actuellement, des enquêtes sont réalisées afin de mieux comprendre l'impact des sorties cartographiques sur les pratiques et stratégies de productions des viticulteurs. Il apparaît notamment que cette méthode cartographique par SIG a prouvé son intérêt en tant qu'outil de communication entre la recherche et les professionnels viticoles. Dans le cadre du projet GICC-TERADCLIM, nous prévoyons d'intégrer une « couche » supplémentaire dans le SIG qui comprendra les résultats des simulations du changement climatique pour les 30-50 années à venir avec également les propositions d'adaptation issues de la modélisation par Système Multi-Agent DAHU (ex : Adaptation matériel végétal et pratiques/conditions environnementales). Cet outil cartographique, qui permettra de sensibiliser les professionnels viticoles au changement climatique, sera utilisé dans les vignobles des Coteaux du Layon en partenariat avec l'INRA d'Angers (partenaire scientifique du projet) et le syndicat viticole des Coteaux du layon (partenaire Acteur).

- Des ateliers participatifs avec les acteurs de la profession viticole : nous prévoyons la réalisation de ces ateliers afin d'analyser avec eux les points suivants :
 - sensibilité et vulnérabilité à la variabilité climatique ;
 - utilisation de l'information climatique pour la prévision des échelles courtes (quelques heures à plusieurs mois) ;
 - besoins non couverts par l'information climatique disponible ;
 - existence de couvertures (assurance) climatiques satisfaisantes et besoins non satisfaits ;
 - sensibilité au changement climatique ;
 - compréhension des causes et des enjeux pour la profession ;
 - formation aux outils et méthodes nécessaires au développement de stratégies d'adaptation ;

Ces points ont déjà commencé à être abordés par J.P. Boulanger dans les vignobles de Mendoza (Argentine), dans le cadre du GICC-TERADCLIM, afin de renforcer le dialogue avec la profession viticole et assurer une confiance durable entre la profession et la recherche.

En parallèle à ces ateliers, nous réalisons des fiches synthétiques de communication et dissémination vers tous les producteurs. Pour chaque vignoble où nous avons installé

des stations et des capteurs météorologiques, nous diffusons, aux viticulteurs et aux syndicats de vignerons des fiches avec l'analyse des données météorologiques et le calcul d'indices bioclimatiques. Nous insistons sur la variabilité spatio-temporelle des données météorologiques entre chaque station.

Les fiches agro-climatiques et le futur lien internet permettront à la profession viticole d'avoir accès aux analyses climatiques à l'échelle régionale et à celle de leur exploitation de façon à les confronter aux préconisations issues des études des terroirs et à mettre en œuvre les pratiques à court et moyen terme qui s'imposent.

3.4 Applications futurs : au-delà la vigne... entre monde agricole et milieux urbains

Le projet de pérennisation du réseau de mesures agroclimatique et de modélisation de l'impact du changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles a fait l'objet d'un programme de recherche qui a été soumis dans le cadre du *FP7 Européen* dans la catégorie *ERC-Starting Grants*.

Certains vignobles expérimentaux équipés dans le cadre de l'ANR-JC-TERVICLIM ont été intégrés dans plusieurs programmes de recherches soumis récemment et dont nous sommes actuellement dans l'attente des résultats :

- Le projet LACAVE (Long term impacts and Adaptations to Climate change in Viticulture and Enology) a été déposé en 2011 dans le cadre du méta-programme « Adaptation au Changement Climatique de l'Agriculture et de la Forêt » (ACCAF) de l'INRA. Ce projet est coordonné par N. Ollat (INRA-Bordeaux) et J.M. Touzard (SUPAGRO-Montpellier). Je suis le coordinateur avec N. Ollat et G. Barbeau (INRA-Angers) du WP1 sur la caractérisation et la perception du changement climatique en viticulture. Dans le cadre de ce projet, les vignobles du Val de Loire (site d'étude de l'ANR-JC-TERVICLIM depuis 2008), de Saint-Emilion (Bordelais) et du Languedoc Roussillon seront étudiés. La première étape concernant le dépôt d'une lettre d'intention a été acceptée. Le projet final a été déposé en octobre 2011 et les résultats sont attendus pour décembre 2011;

- Le projet ALMIRA (Adapting Landscape Mosaics of mediterranean Rainfed Agrosystems for a sustainable management of crop production, water and soil resources) a été déposé en septembre 2011 dans le cadre du programme ARIMNet (Recherche Agronomique en Méditerranée) Financé par la Commission européenne. Ce projet est coordonné par F. Jacob (SUPAGRO-Montpellier), M. Chikhaoui (IAV-Rabat) et I. Mekki (INRGREF, Tunis). J'interviens dans le WP4, coordonné par F. Huard (AGROCLIM-Avignon), sur l'utilisation des données désagrégées du modèle ARPEGE-Climat pour évaluer l'impact du changement climatique à l'échelle du terroir viticole de la vallée de La Peyne (Languedoc).

Au-delà des projets en liaison avec le monde viticole, cette démarche scientifique visant à simuler l'impact du changement climatique aux échelles fines est appliquée à d'autres domaines. En milieu urbain, les incertitudes liées à l'impact du changement

climatique sur l'intensification de vagues de chaleur posent un certain nombre de questions sur l'adaptation notamment au niveau de la fréquence et de l'intensité des canicules et par conséquent, sur les impacts sur la qualité de vie et sur des questions sanitaires. L'analyse spatiale du climat en fonction de la structure urbaine présente et future permet de fournir, aux élus et aux décideurs, des scénarios du climat adaptés à l'échelle de la ville notamment dans le cadre des Plans Climat Energie. En milieu urbain, comme en viticulture ou dans d'autres domaines agricoles, l'analyse de l'impact du changement climatique en milieu urbain passe par une démarche scientifique pluridisciplinaire où le géographe-climatologue pourra apporter ses compétences en termes de mesures « terrain » et d'analyse spatiale.

Bibliographie

André J.- C., Déqué M., Roger P., Planton S. , 2004 : La vague de chaleur de l'été 2003 et sa prévision saisonnière. *Comptes Rendus Geosciences*, Volume 336, **6**, 491-503.

Association Viticole Champenoise, 1991: *Les gelées de printemps*. Le Vigneron Champenois. Hors série, 63p.

Avissar R.; Mahrer Y., 1988 : Mapping frost-sensitive areas with a 3D local-scale numerical model. Part I: Physical and numerical aspects. *J. of Applied Meteorology*, **27** (4), 400-413.

Barbeau G, 2007 : Climat et vigne en moyenne vallée de la Loire. *Congrès sur le climat et la viticulture. Saragosse, Espagne, 10-14 avril 2007*, 106-111.

Barbeau G., Bournand S., Champenois R., Bouvet M.H., Blin A. et Cosneau A., 2004 : Comportement de 4 cépages rouges du Val de Loire. Relations entre les variables climatiques et la composition des baies. *J. Int. Sci. Vigne et Vin*. **38**, 1, 35-40.

Battaglini A, Barbeau G, Bindi M, Badeck FW, 2009 : European winegrowers' perceptions of climate change impact and options for adaptation. *Regional Environmental Change*, **9**, 61-73.

Bellia S., Douguedroit A. et Seguin B., 2008 : Impacts du réchauffement sur les étapes phénologiques du Grenache et de la Syrah dans les Côtes du Rhône Méridionales et les Côtes de Provence (1976-2000) », *Journées de Climatologie, Nantes, 13-14 mars, Climat et société : Climat et végétation*, 10 p.

http://134.59.38.8/~umr/climat/climat_societe/Nantes2008/3-AD_cd.pdf.

Bigot S. et Rome S., 2010 : Contraintes climatiques dans les Préalpes françaises : évolution récente et conséquences potentielles futures. *EchoGéo* [En ligne], numéro 14 | 2010. URL : <http://echogeo.revues.org/12160>

Blennow K. and Persson P., 1998: Modelling local-scale frost variations using mobile temperature measurements with a GIS. *Agricultural and forest Meteorology*, **89**, 59-71.

Bonnardot V., Cautenet S., Planchon O. et Quénol H., 2011 : Simulations climatiques méso-échelles : comparaison de données observées et simulées en vue d'une intégration de scénarios de changement climatique. *Actes du XXIVème colloque de l'AIC*, Rovereto, Italie, 93-98.

Bonnardot V, and Cautenet S., 2009: Mesoscale Atmospheric Modeling Using a High Horizontal Grid Resolution over a Complex Coastal Terrain and a Wine Region of South Africa. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **48(2)**, 330 (on line).

Bonnardot V., Carey V., Madelin M., Cautenet S. and Quénol H., 2012: Using atmospheric and statistical models to understand local climate and assess spatial temperature variability at fine scale over the Stellenbosch wine district, South Africa. *International Journal of Vine and Wine Sciences*. (sous presse).

Bonnardot V., Planchon O. and Cautenet S., 2005 : The sea breeze development under an offshore synoptic wind in the South Western Cape and implications for the Stellenbosch wine producing area. *Theor. Appl. Clim.*, **81**, 203-218.

Bonnardot V., Planchon O., Carey V.A. and Cautenet S., 2002 : Diurnal wind, relative humidity and temperature variation in the Stellenbosch-Groot Drakenstein winegrowing area. *S. Afr. J. Enol. Vitic.*, **23**, 2, 62-71.

Boulanger, J.-P., G. Brasseur, A. F. Carril, M. Castro, N. Degallier, C. Ereño, J. Marengo, H. Le Treut, C. Menendez, M. Nuñez, O. Penalba, A. Rolla, M. Rusticucci, R. Terra, 2011: The European CLARIS Project: A Europe-South America Network for Climate Change Assessment and Impact Studies, *Climatic Change*, CLARIS Special issue, DOI 10.1007/s10584-009-9734-8.

Bradley A.V., Thornes J.E., Chapman L., Unwin D. and Roy M., 2002 : Modelling spatial and temporal road thermal climatology in rural and urban areas using a GIS. *Clim Res*, **22**, 41-55.

Briche E., 2011 : *Changement climatique dans le vignoble de Champagne : modélisation thermique à plusieurs échelles spatio-temporelles (1950-2100)*. Thèse de doctorat de l'Université Denis Diderot (Paris 7), 263p.

Briche E., Quénol H. et Beltrando G., 2011 : Changement climatique dans le vignoble champenois. L'année 2003, préfigure-t-elle les prévisions des modèles numériques pour le XXI^e siècle ? *L'Espace Géographique*, **2/11**, 164-175.

Briche E., Bonnefoy C., Cautenet S., Bonnardot V., Beltrando G., Madelin M. et Quénol H., 2011. Simulations du modèle à méso-échelle RAMS à résolution fine lors des épisodes extrêmes de 2003 : application à deux vignobles du nord de la France. *Actes du XXIV^{ème} colloque de l'AIC*, Rovereto, Italie, 111-116.

Brohan, P., Kennedy, J., Haris, I., Tett, S. et Jones, P., 2006 : Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850. *Journal of Geophysical Research*, **111**, (D12 106).

Brosset D. Claramunt C. et Saux, E., 2008: A stochastic algorithm for the optimization of wayfinding processes, *PLACE : Workshop Giscience 2008, Utah Park, USA*.

Brosset D. Claramunt C. et Saux, E., 2008 : An ACS cooperative learning approach for route finding in natural environment, *proceedings of the 16th ACM GIS International Conference in Advances in Geographical Information Systems (ACM GIS)*, USA.

Brosset D. Claramunt C. et Saux, E., 2008: Wayfinding in natural and urban environments: a comparative study, *Cartographica, Toronto University Press*, 43(1), pp. 21-30.

Brosset D., Claramunt C. et Saux, E., 2007: A location and action-based model for route descriptions , in *Proceedings of the 2nd International Conference on Geospatial Semantics, F. Fonseca, A. Rodriguez and S. Levashkin (eds.)*, Springer Verlag, LNCS 4853, Mexico, pp. 146-159.

Burgos S, Almendro S, Fortier E., 2011 : Impact of pedoclimatical conditions on the precocity potential of vineyards in the Canton of Geneva. *Proceedings of VIIIth International Terroir Congress, Soave, Italy*, **2**, 20-25.

Cabré MF, Solman SA, Nuñez MN., 2010 : Creating regional climate change scenarios over southern South America for the 2020's and 2050's using the pattern scaling technique: validity and limitations. *Climate Change*, **98**, 449-469.

Carey VA, Bonnardot V, Schmidt A, Theron JCD., 2003 : The interaction between vintage, vineyard site (mesoclimate) and wine aroma of *Vitis vinifera* L. cvs. Sauvignon blanc, Chardonnay and Cabernet Sauvignon in the Stellenbosch-Klein Drakenstein wine producing area. *OIV Bulletin*, **76**, 4-29.

Case, Jonathan L., John Manobianco, Allan V. Dianic, Mark M. Wheeler, Dewey E. Harms, Carlton R. Parks, 2002: Verification of High-Resolution RAMS Forecasts over East-Central Florida during the 1999 and 2000 Summer Months. *Wea. Forecasting*, **17**, 1133–1151.

Castel T., Xu Y., Richard Y., Pohl B., Crétat J., Thévenin D., Cuccia C., Bois B., Roucou P., 2010 : Désagrégation dynamique haute résolution spatiale du climat du centre est de la France par le modèle climatique régional ARW/WRF. *Actes du XXIIIe Colloque de l'AIC, Rennes*, 107-112.

Cellier P., 1989 : Mécanismes du refroidissement nocturne : application à la prévision des gelées de printemps. *Actes de séminaires de la Com. d'agrométéo. De l'INRA « le gel en agriculture »*, 145-164.

Champagnol F., 1984 : *Eléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale*. Saint-Gely-du-Fesc, France, 351p.

Chapman L. and Thornes J.E., 2006. The use of geographical information systems in climatology and meteorology, *Progress in physical geography*, **30**, 677-689.

Chen, F., R. Pielke Sr., and K. Mitchell, 2001: Development and application of land-surface models for mesoscale atmospheric models: Problems and promises. Observation and Modeling of the Land Surface Hydrological Processes, V. Lakshmi, J. Albertson, and J. Schaake, Eds., *Amer. Geophys. Union*, 107–135.

Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr and P. Whetton, 2007: Regional Climate Projections. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Chuine, I., P. Yiou, N. Viovy, B. Seguin, V. Daux, E. Leroy Ladurie, 2004: Grape ripening as a past climate indicator. *Nature*, **432**, 289–290.

Clark, T. L., and R. D. Farley, 1984: Severe downslope windstorm calculations in two and three spatial dimensions using an elastic interactive grid nesting: A possible mechanism for gustiness. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 329–350.

CTIFL, 1998 : *Gel de printemps*. Brochure Ctifl, 151.

Cox R., Bauer B.L. & Smith T., 1998 : A mesoscale model intercomparison. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 79, no2, 265-283.

Déqué M., 2007: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, **57**, 16-26.

Déqué M., Jones R.G., Wild M., Giorgi F., Christensen J.H., Hassell D.C., Vidale P.L., Rockel B., Jacob D., Kjellström E., de Castro M., Kucharski F. and van den Hurk B., 2005 : Global high resolution versus Limited Area Model climate change projections over Europe : quantifying condense level from PRUDENCE results. *Climate Dyn.*, **25**, 653-670.

Done J., Davis C.A. & Weisman M., 2004 : The next generation of NWP: explicit forecasts of convection using the weather research and forecasting (WRF) model, *Atmos. Sci. Let.* **5**, 110–117.

Dubreuil V., Quénol H., Planchon O. et Clergeau P., 2008 : Variabilité quotidienne et saisonnière de l'Ilot de Chaleur urbain à Rennes : premiers résultats du programme Ecorurb. *XXIème colloque de l'AIC, Montpellier, 9-13 septembre 2008*, 221-227.

Duchêne C., 1996 : Le vignoble angevin. CIVAS, 11p.

Duchêne E, Schneider C. 2005. Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agronomy for Sustainable Development*, **25**, 93-99.

Dudhia J., 2003: MM5: current status and plans, MM5 Workshops, Division 1. www.mmm.ucar.edu/mm5/workshop/workshop-program-2003.html.

Fallot J.M., 1992 : *Etude de la ventilation d'une grande vallée préalpine (la vallée de la Sarine en Gruyère)*. Thèse de l'Université de de Fribourg, Suisse, 475p.

Gachon P., 2009 : les méthodes de régionalisation utilisées dans le développement de scénarios de changements climatiques : forces, faiblesses et applications. *Conférence au Cérège*, Aix-en-Provence, 27/11/09.

Gandu A. W., Cohen JCP. & Souza JRS., 2004 : Simulation of deforestation in eastern Amazonia using high resolution model. *Ther. Appl. Climatol.*, **78**, 123-135.

Garcia de Cortazar, A. I., 2006: *Adaptation du modèle STICS à la vigne (Vitis vinifera L.). Utilisation dans le cadre d'une étude du changement climatique à l'échelle de la France*. Thèse de doctorat de L'Ecole Supérieure Nationale d'Agronomie, Montpellier, 175p.

Giorgi F., 2006 : Regional climate modeling: status and perspectives. *J. Phys.*, **139**, 101–118.

Gladstones J. 1992. *Viticulture and environment*. Wine Titles: Adelaide, 310.

- Guyot G., 1997 : Climatologie de l'environnement. Masson, 505 p.
- Hall , A. and G.V. Jones : Spatial analysis of climate in winegrape growing regions in Australia. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, *in Press Spring* 2010.
- Hall A, Jones GV., 2010 : Spatial analysis of climate in winegrape growing regions in Australia. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, **3**, 389-404.
- Hansen, J.E., R. Ruedy, Mki. Sato, M. Imhoff, W. Lawrence, D. Easterling, T. Peterson, and T. Karl, 2001: A closer look at United States and global surface temperature change. *J. Geophys. Res.*, **106**, 23947-23963, doi:10.1029/2001JD000354.
- Hansen, J., R. Ruedy, Mki. Sato, and K. Lo, 2010: Global surface temperature change. *Rev. Geophys.*, **48**, RG4004, doi:10.1029/2010RG000345.
- Heinemann P.H. and Martsolf J.D., 1988 : Prediction of cooling of the nocturnal environment using two atmospheric models. *J. Applied Meteorology*, **27** (4), 473-481.
- Helmis, C. G., D. N. Asimakopoulos, D. G. Deligiorgi, and D. P. Lalas, 1987: Observations of sea breeze fronts near the shoreline. *Bound.-Layer Meteor.*, **38**, 395-410.
- Howden SM, Soussana J-F, Tubiello FN, Chhetri N, Dunlop M, Meinke H. 2007 : Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the National. Academy of Science*, **104**, 19691-19696.
- Huglin P., 1986 : *Biologie et écologie de la vigne*. Ed. Payot (Lausanne), 372p.
- Hunter J.J. and Bonnardot V., 2011 : Suitability of some climatic parameters for grapevine cultivation in South Africa, with focus on key physiological processes. *S. Afr. J. Enol. Vitic*, **32** (1), 137-154.
- INAO, 1984 : Une réussite française : l'appellation d'origine contrôlée, vins et eaux de vie. Institut national des appellations d'origine, *Euro-impressions*, Paris.
- IPCC, 2007: *Climate Change: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*. Contribution of the Working Group I to the Fourth Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 18 p.
- Jacob D., Barring L., Christensen O.B., Christensen J.H., de Castro M., Déqué M., Giorgi F., Hagemann S., Hirschi M., Jones R., Kjellstrom E., Lenderink G., Rockel B., van Ulden A.P., van den Hurk B.J.J.M., 2007: An intercomparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate, *Climatic Changes*, 53-70.
- Joly D., Nilsen L., Fury R., Vermot-Desroches B. Et Jacquinet J-P., 1994 : Interpolation des températures à grande échelle. *Revue Internationale de Géomatique*, **vol 4**, n°1, 55-85.
- Jones, G.V, Duff, A.A., Hall, A., and J. Myers, 2009 : Spatial analysis of climate in winegrape growing regions in the western United States." *American Journal of Enology and Viticulture*, *in Press Spring* 2010.
- Jones, G.V., 2005: How Hot is Too Hot? *Wine Business Monthly*, **12(2)**, February 2005.

- Jones, G.V., 2006 : *Climate and Terroir: Impacts of Climate Variability and Change on Win, in Fine Wine and Terroir - The Geoscience Perspective*. Macqueen, R.W., and Meinert, L.D., (eds.), Geoscience Canada Reprint Series Number 9, Geological Association of Canada, St. John's, Newfoundland, 247 p.
- Jones, G.V., 2007 : Spatial Changes in Global Viticulture Zones. In process *Winter 2007*.
- Jones, G.V. , 2007 : Structure and trends in wintertime extreme minimum temperatures in eastern Washington and the Niagara region of Canada. In *process Winter 2007*.
- Jones, G.V., 2005 : Climate change in the western United States grape growing regions, *Acta Horticulturae (ISHS)*, **689**, 41-60.
- Jones, G.V., Duchene, E., Tomasi, D., Yuste, J., Braslavksa, O., Schultz, H., Martinez, C., Boso, S., Langellier, F., Perruchot, C., and G. Guimberteau, 2005 : Changes in European Winegrape Phenology and Relationships with Climate, *GESCO 2005*. August 2005.
- Jones, G.V., Goodrich, G.B., and J. Miller, 2007 : Influences of Climate Variability on the U.S. West Coast Wine Regions and Wine Quality in the Napa Valley. In process *Winter 2007*.
- Jones, G.V., M. Moriondo, B. Bois, A. Hall, and A. Duff, 2009: Analysis of the spatial climate structure in viticulture regions worldwide. *Le Bulletin de l'OIV* 82(944,945,946):507-518.
- Jones, G.V., Myers, J., White, M.A., and S. Surbey, 2007 : Reanalysis of Winkler Regions for the Western United States. In process *Winter 2007*.
- Jones, G.V., White, M.A., Cooper, O.R., and K. Storchmann, 2005 : Climate Change and Global Wine Quality, *Climatic Change*, **73(3)**, 319-343.
- Jones, G. V. and R. E. Davis, 2000 : Climate Influences on Grapevine Phenology, Grape Composition, and Wine Production and Quality for Bordeaux, France, *Am. J. Viti. Enol.* **51**, 249-261.
- Kain, John S., S. J. Weiss, J. J. Levit, M. E. Baldwin, D. R. Bright, 2006: Examination of Convection-Allowing Configurations of the WRF Model for the Prediction of Severe Convective Weather: The SPC/NSSL Spring Program 2004. *Wea. Forecasting*, **21**, 167–181.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R. and Joseph D., 1996 : The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77 (3)**, 437-470.
- Kergomard C., Bigot S., Charabi Y. et Leriche P., 2002 : Climat urbain et qualité de l'air : approches géographiques et collaborations pluridisciplinaires. *Bulletin Association de Géographes Français*, **4**, 462-473.
- Kidson JW., 2000 : An analysis of New Zealand synoptic types and their use in defining weather regimes. *International Journal of Climatology*, **20**, 299–316.

- Klein Tank A.M.G. and Coauthors, 2002 : Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *Int. J. of Climatol.*, **22**, 1441-1453.
- Klemp J., 2006, Research-Community priorities for WRF-System development, National Center for Atmospheric Research, WRF Research Applications Board.
- Kondo J. and Okusa N., 1990 : A simple numerical prediction model of nocturnal cooling in a basin with various topographic parameters, *J. Applied Meteorology*, **29 (7)**, 604-619.
- Kondo J. and Okusa N., 1990 : A simple numerical prediction model of nocturnal cooling in a basin with various topographic parameters, *J. Applied Meteorology*, **29 (7)**, 604-619.
- Kurtzman D. and Kadmon R., 1999 : Mapping of temperature variables in Israel: a comparison of different interpolation methods. *Clim. Res.*, **13**, 33-43.
- Lamy C. et Dubreuil V., 2011 : Modélisation du bilan hydrique en Bretagne dans le contexte du changement climatique : cas du scénario A1B. *Actes du XXIVème colloque de l'AIC*, Rovereto, Italie, 357-362.
- Laprise R., 2008 : Regional climate modelling, *Journal of Computational Physics*, **227**, 3641-3666.
- Laughlin G. P. and Kalma J.D., 1987 : Frost hazard assessment from local weather and terrain data. *Agricultural and Forest Meteorology*, **40(1)**, 1-16.
- Le Roy Ladurie E., 2009 : *Histoire humaine et comparée du climat TOME 3 1860-2008*. Ed. Fayard, 262p.
- Le Tixerant M., Tissot C., 2008 : Impact evaluation of a Marine Renewable Energy project on human activities dynamic, *Second International Conference on Ocean energy (ICOE) "Targeting successful deployment of commercially viable ocean energy systems worldwide"*, Brest, 12 p.
- Le Treut H., 2009 : *Nouveau Climat sur la Terre : comprendre prédire, réagir*. Flammarion, 241p.
- Le Treut H., 2010 : Modèles climatiques : certitudes, incertitudes et impacts locaux. Actes du 23ième colloque de l'AIC, In *Risques et changement climatique*, Ed Dubreuil et al., 2010 ; Rennes, pp 7-10. ISBN : 978-2-907696-16-6. p7-10.
- Le Treut, H., R. Somerville, U. Cubasch, Y. Ding, C. Mauritzen, A. Mokssit, T. Peterson and M. Prather, 2007 : Historical Overview of Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 36p.
- Leduc M. and Laprise R., 2009 : Regional climate model sensitivity to domain size, *Clim. Dyn.*, **32**, 833-854, DOI 10.1007/s00382-008-0400-z.

- Chabin J.P., Madelin M. et Bonnefoy C., 2007 : Les vignobles beaunois face au réchauffement climatique. in *Global warming, which potential impacts on the vineyards? 28-30 mars 2007 / March 28-30, 2007*. 13p.
- M. Le Tixerant, C. Tissot, F. Gourmelon, D. Brosset, 2010 : Modelling of human activity development in coastal sea areas, *Journal of Coastal Conservation: Planning and Management*, (in press).
- Maciel A., Monteiro A., Quénol H. et Beltrando G., 2007 : Extremos térmicos e vulnerabilidade num vinhedo do Entre Douro e Minho. *Finisterra*, vol XLII, n°83, 23-45.
- Madelin M. and Beltrando G., 2005 : Spatial interpolation based mapping of spring frosts hazard in the Champagne vineyard. *Meteorol. Appl.*, **12** (1), 51-56.
- Mavrakis A., H. A. Flocas, E. Mavromatidis, G. Kallos, G. Theoharatos, A. Christides, 2010: A case of nighttime high ozone concentration over the greater Athens area. *Meteorologische Zeitschrift*, **Vol. 19**, No. 1, 035-045. DOI 10.1127/0941-2948/2010/0428
- McQueen, J. T., R. R. Draxler, and G. D. Rolph, 1995: Influence of grid size and terrain resolution on wind field predictions from an operational mesoscale model. *J. Appl. Meteor.*, **34**, 2166–2181.
- Merlier C., 2001 : *Interpolation des données spatiales en climatologie et conception optimale des réseaux climatologiques*. Annexe du rapport de Météo-France concernant ses activités en rapport avec la Commission for Climatology (CCI) de l'OMM, 21p.
- Miller, S. T. K., B. D. Keim, R. W. Talbot, and H. Mao, 2003: Sea breezes: Structure, forecasting and impacts. *Rev. Geophys.*, **41**, 1011, doi:10.1029/2003RG000124.
- Morlat R., 2010 : *Traité de viticulture de terroir*. Ed. Lavoisier, 492p.
- Narapusetty B., Mölders N., 2005 : Evaluation of Snow Depth and Soil Temperatures Predicted by the Hydro–Thermodynamic Soil–Vegetation Scheme Coupled with the Fifth-Generation Pennsylvania State University–NCAR Mesoscale Model. *Journal of Applied Meteorology*, **44**, 12, 1827-1843.
- Neumann P. and Matzarakis A., 2011 : Viticulture in southwest Germany under climate change conditions. *Climate Research*, **47**, 161-169.
- Oke T.R., 1987: *Boundary Layer Climates*. Second Edition, London, 372p.
- Pachauri R.K. and Reisinger A., 2007: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland. pp 104.
- Pagé C., 2008 : Format des données SAFRAN et scénarios climatiques désagrégés au CERFACS. *Climate modelling and Global Change TR/CMGC/08/27*, 8p.
- Pagé C., Terray L. et Boé J., 2008 : *Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH08*. Rapport Climate Modelling and Global Change TR/CMGC/08/64. 21p.

Pagney, P., 1988 : *Climats et cours d'eau de France*. Masson, Paris, 166 p.

Pattanayak S., U. C. Mohanty, S. R. Rizvi, X. -Y. Huang et K. Naga Ratna, 2008 : A comparative study on performance of MM5 and WRF (ARW & NMM) models in simulation of tropical cyclone over Bay of Bengal.

www.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2008/WorkshopPapers.php

Pedelaborde P., 1957 : *Le climat du Bassin Parisien*. Génin, Paris, 539 p.

Pielke R.A., W. R. Cotton, R. L. Walko, C. J. Tremback, W. A. Lyons, L. D. Grasso, M. E. Nicholls, M. D. Moran, D. A. Wesley, T. J. Lee, J. H. Copeland., 1992 : A comprehensive meteorological modeling system: RAMS. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **49**,1-4, 69-91.

Pielke, R.A., W.A. Lyons, R.T. McNider, M.D. Moran, D.A. Moon, R.A. Stocker, R.L. Walko, and M. Uliasz, 1991: Regional and mesoscale meteorological modeling as applied to air quality studies. *Air Pollution Modeling and Its Application VII* , eds. H. van Dop and D. G. Steyn. Plenum Press, New York and London, 259-290.

Planchon, O., 1994. À propos de la notion de climat maritime. *Études Méditerranéennes*, **16**, 119-130.

Planchon, O., 1997. *Les Climats Maritimes dans le Monde*. Presses Universitaires du Septentrion, Villeneuve d'Ascq, 233 p.

Planton S., 2003 : A l'échelle des continents : le regard des modèles, *C. R. Geoscience*, **335**, 535-543.

Quénol H., 2002 : *Climatologie appliquée aux échelles spatiales fines : influence des haies brise-vent et d'un remblai ferroviaire sur le gel printanier et l'écoulement du mistral*. Edition ANRT, ISBN 2-284-04081-0, 283 p.

Quénol H., Maciel A., Monteiro A. et Beltrando G., 2004 : Mesures climatiques aux échelles fines (météorologiques et agronomiques) et variabilité spatiale du gel printanier dans le vignoble de Vinho Verde. *Norois*, 4/2004, **193**, 117-132.

Quénol H., Maciel A., Monteiro A. et Beltrando G., 2007 : Variabilidade espacial do gelo primaveril nos vinhedos do Vinho Verde (Portugal), *Geografia*, jan/avr 2007, 32/1, 5-27.

Quénol, H., Planchon, O. et Wahl, L., 2008 : Méthodes d'identification des climats viticoles. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, **51**, 127-137.

Quénol H., Dubreuil V., Mimet A., Pellissier V., Aguejdad R., Clergeau P. et Bridier S., 2010 : Climat urbain et impact sur la phénologie végétale printanière. *La Météorologie*. **88**, 50-57.

Quense J., 2011 : *Changement climatique et dynamique de la végétation dans les Andes du Chili central, depuis le milieu du XXe siècle : l'exemple de la vallée de Yerba Loca*. Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble, 271p.

Rosenbluth, B., Fuenzalida, H. et Aceituno, P., 1997 : Recent temperature variations in southern south america. *International Journal of Climatology*, **17**, 67-85.

Rouan M., Kerbiriou C., Levrel H., Etienne M., "A co-modelling process of social and natural dynamics on the isle of Ouessant: Sheep, turf and bike", special issue "Modelling with Stakeholders" of Environmental Modelling & Software, Volume **25**, Issue 11, November 2010, 1399-1412.

Seguin B. et García de Cortázar Atauri I., 2004 : Climate warning : consequences for viticulture and the notion of "terroirs" in Europe. Proceedings of The Seventh International Symposium of Vineyard Physiology and Biotechnology. 21-25 juin Davis (USA). *Acta Horticulturae*. **689**, 61-70.

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. et Miller, H. L., 2007 : *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge et New York, 996 p.

Stahl K., Moore R.D., Floyer J., Asplin M. and McKendry I., 2006 : Comparison of approaches for spatial interpolation of daily air temperature in a large region with complex topography and highly variable station density. *Agr. Forest. Meteorol.*, **139**, 224-236.

Sturman AP, Tapper NJ. 2006 : *The Weather and Climate of Australia and New Zealand*, 2nd edn. Oxford University Press: Melbourne, 541.

Tillier I. and Tissot C., 2010 : Modelling spatial use conflicts and Nature-Society interactions in coastal areas coupling MAS and GIS, in: *Maanan M., Robin M., Geomatic solutions for coastal environments*, Nova Science Publishers, Inc., 327-346.

Tillier I., Tissot C., Rouan M., Trouillet B., Brosset D., Robin M., 2009 : Modélisation du déroulement d'activités conchylicoles en zone côtière par couplage sig/sma, *MASHS : Modèles et Apprentissage en Sciences Humaines et Sociales*, Toulouse, 12 p.

Tissot C., Cuq F., 2005 : Modélisation spatio-temporelle d'activités humaines à fort impact environnemental, *Cybergéo : Revue européenne de géographie*, n°313, 20 juin 2005, 14 p.

Tonietto J, Carbonneau A., 2004 : A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, **124**, 81-97.

Tonietto J., 1999 : *Les macroclimats viticoles mondiaux et l'influence du mesoclimat sur la typicité de la Syrah et du Muscat de Hambourg dans le sud de la France*. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier. 216p.

Uliasz, M., R.A. Stocker, and R.A. Pielke, 1996: Regional modeling of air pollution transport in the southwestern United States. *Environmental Modeling III*, ed. P. Zannetti, Computational Mechanics Publications, 145-182.

Van Leeuwen, C., P. Friant, X. Choné, O. Tregoat, S. Koundouras, D. Dubourdieu, 2004: Influence of climate, soil, and cultivar on terroir. *American Journal of Enology and Viticulture* 55: 207-217.

Vaudour E., 2003 : *Les terroirs viticoles : définitions, caractérisation et protection*. Ed. Dunod, 293p.

Walko, R. L., C. J. Tremback, R. A. Pielke, and W. R. Cotton, 1995: An interactive nesting algorithm for stretched grids and variable nesting ratios. *J. Appl. Meteor.*, **34**, 994–999.

Webb L, Dunn GM, Barlow EWR. 2010 : Winegrapes, In *Adapting agriculture to climate change: preparing Australian agriculture, forestry and fisheries for the future*. Stokes C, Howden M (eds). *CSIRO Publishing*: Melbourne, 101-118.

Webb L, Whetton PH, Barlow EWR. 2007 : Modelled impact of future climate change on the phenology of winegrapes in Australia. *Climate change and Grapevine Phenology*, **13**, 165-175.

Webb L, Whetton PH, Barlow EWR. 2008. Climate change and winegrape quality in Australia. *Climate Research*, **36**, 99-111.

Winkler A.J., Cook J.A., Kliewer W.M. et Lider L.A., 1974. *General viticulture*, Berkeley, University of California, 710 p.

X, 2010 : validation required. *Nature*, Vol 463, Issue no. 7283, 18 February 2010, 1p. <http://www.nature.com/nature/journal/v463/n7283/full/463849a.html>

Yoshino M., 1975: *Climate in a small area : an introduction to local meteorology*.

Liste des figures

Figure 1 : Classification des échelles spatio-temporelle selon des ordres de grandeur (adapté d'après Choisnel, 1987)

Figure 2 : Approche systémique de la variabilité climatique aux échelles locales.

Figure 3 : Caractéristiques des postes de mesures météorologiques disposés dans la région do Entre Douro e Minho (a) dans les vignobles expérimentaux de Monção (b) et d'Arcos de Valdevez (c) (Portugal) (Quénol et al., 2007).

Figure 4 : Températures minimales de la nuit du 15 au 16 février 2003 à Arcos de Valdevez (a) et à Monção (b). (Quénol et al., 2007)

Figure 5 : Occupation du sol dans un rayon de 200m autour de 6 stations météorologiques de la métropole rennaise (Quénol et al., 2010).

Figure 6 : Evolution de la phénologie du cerisier en fonction de l'occupation du sol dans la métropole rennaise entre le 1^{er} mars et le 1^{er} avril 2005.

Figure 7 : Principes de la modélisation statistique multicritères appliquée aux échelles fines (Madelin et Quénol, 2012)

Figure 8 : Principes théoriques de la modélisation numérique méso-échelle appliquée à l'échelle des terroirs viticoles.

Figure 9 : Principaux facteurs caractérisant les terroirs viticoles.

Figure 10 : Répartition des vignobles étudiés dans le cadre de Terviclim et Teradclim

Figure 11 : Indices bioclimatiques d'origine thermique calculés durant la période de croissance de la vigne dans l'hémisphère nord.

Figure 12 : Evolution des températures minimales et maximales au niveau des différents vignobles expérimentaux sur la période 1960- 2010.

Figure 13 : Température moyenne annuelle entre 1941 et 2010 calculée à partir de 7 stations météorologiques en Nouvelle Zélande (sources : NIWA)

Figure 14 : Evolution des températures minimales (a) et maximales (b) dans les vignobles de la Vallée Centrale Otago (station Queenstown), de Nelson et Hawkes Bay (station Napier) entre 1960 et 2010.

Figure 15 : Evolution de l'Indice d'Huglin dans les vignobles de la Vallée Centrale Otago (station Queenstown), de Nelson et Hawkes Bay (station Napier) entre 1960 et 2010 (sources : NIWA).

Figure 16 : Stations et capteurs météorologiques disposés en fonction des échelles spatiales imbriquées : a) de la Vallée de la Loire, b) en passant par les vignobles d'Anjou et Saumurois c) jusqu'au Quart de Chaumes

Figure 17 : Températures moyennes, minimales et maximales annuelles pour des stations représentatives du climat régional du Val de Loire (1948-2008)

Figure 18 : Evolution de l'Indice de Winkler avant et après la rupture d'homogénéité des séries climatiques (1953-2008) (d'après Bonnefoy et al., 2011)

Figure 19 : Evolution de l'Indice de Huglin (1960-2010) à Nantes, Angers, Saumur et Tours (d'après Bonnefoy et al., 2011).

Figure 20 : Indices de Winkler (a) et d'Huglin (b) dans l'Anjou et le Saumurois

Figure 21 : Observations phénologiques au cours du débourrement (a) et de la véraison (b) en 2008 en Anjou.

Figure 22 : Températures minimales (a) et maximales (b) moyennes mensuelles dans les Coteaux du Layon (Bonnefoy et al., 2010)

Figure 23 : Températures minimales du 21 mars 2011 enregistrées par les Tynitag dans le vignoble des Coteaux du Layon (appellation Quart de Chaumes).

Figure 24 : Températures (a), humidité relative (b) et vitesse du vent (c) enregistrées toutes les 15 mn sur les stations « Chaumes » et « Beaulieu » la nuit du 21 mars 2011

Figure 25 : Températures maximales du 4 juillet 2011 enregistrées par les Tynitag dans le vignoble des Coteaux du Layon (appellation Quart de Chaumes).

Figure 26 : Températures (a), humidité relative (b) et vitesse du vent (c) enregistrées toutes les 15 mn sur les stations « Chaumes » et « Beaulieu » le 4 juillet 2011

Figure 27 : Cumuls des degrés jours (a) et Indice d'Huglin (b) calculés pour la période végétative de 2009 enregistrées par les Tynitag dans le vignoble des Coteaux du Layon (appellation Quart de Chaumes). (Bonnefoy et al., 2010)

Figure 28 : Localisation du vignoble (a) et des instruments de mesures (b) dans le district de Stellenbosch. (Bonnardot et al., 2012)

Figure 29 : Caractéristiques des grilles imbriquées pour la modélisation RAMS (Bonnardot et al., 2012).

Figure 30 : Températures minimales moyennes de janvier à mars 2009 enregistrées par les Tynitags dans le vignoble de Stellenbosch. (Bonnardot et al., 2012)

Figure 31 : Fréquence des températures minimales moyennes de janvier à mars 2009. (Bonnardot et al., 2012)

Figure 32 : Températures modélisées à 200m de résolution : représentations horizontale (z=24m) et transect vertical Ouest-Est (b) (05 mars 2009 à 06h00). (Bonnardot et al., 2011)

Figure 33 : Comparaison entre les données thermiques simulées à 2m (RAMS et WRF) et les données observées des stations de Jabobsdal (a) et de Meerlust (b)

Figure 34 : Modélisation multicritères des températures minimales moyennes dans le district viticole de Stellenbosch (a) et discrétisation suivant les températures utilisées pour la maturité de la vigne (b) (réalisation M. Madelin).

Figure 35 : Modélisation multicritères des températures minimales dans le district viticole de Stellenbosch pour la nuit du 5 mars 2009 (a) avec une classification tous les 2°C (b) (réalisation M. Madelin).

Figure 36 : Grilles imbriquées et localisation des stations météorologiques utilisées

Figure 37 : Différences entre les températures moyennes mensuelles simulées par RAMS (5 km) ou par ARPEGE (~ 50 km) et les températures moyennes mensuelles observées pour 34 stations et 3 mois sur la période de référence (1991-2000).

Figure 38 : Fréquence des biais sur les températures minimales d'avril (différences entre les valeurs simulées par RAMS ou ARPEGE et les valeurs observées) pour 3 stations viticoles françaises et en moyenne pour les 3 stations. Période 1991-2000.

Figure 39 : Fréquence des biais sur les températures maximales de juillet (différences entre les valeurs simulées par RAMS ou ARPEGE et les valeurs observées) pour 3 stations viticoles françaises et en moyenne pour les 3 stations. Période 1991-2000.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Vignobles équipés en stations et capteurs météorologiques dans le cadre de l'ANR-JC-TERVICLIM et le GICC-TERADCLIM.

Tableau 2 : Températures minimales moyennes (a) et maximales (b) dans l'Anjou et le Saumurois.

Tableau 3: Matrices de corrélation de Pearson ($p < 0,0001$) entre les températures moyennes mensuelles simulées par RAMS (5 km) ou par ARPEGE (~ 50 km) et les températures moyennes mensuelles observées pour 34 stations et 3 mois sur la période de référence (1991-2000).

Tableau 4 : Statistiques descriptives sur les moyennes des températures minimales du mois d'avril (1991-2000) simulées (par ARPEGE et RAMS) et observées dans 34 stations. Matrice de corrélation Pearson ($p < 0,0001$).

Tableau 5 : Statistiques descriptives sur les différences entre les valeurs simulées par RAMS (5 km) ou par ARPEGE (50 km) et les valeurs observées dans 3 stations viticoles françaises (températures minimales d'avril ; période 1991-2000 ; $n=300$).

Tableau 6 : Statistiques descriptives sur les moyennes de températures maximales du mois de juillet (1991-2000) simulées (par ARPEGE et RAMS) et observées dans 34 stations. Matrice de corrélation de Pearson ($p < 0,0001$).

Tableau 7 : Statistiques descriptives sur les différences entre les valeurs simulées par RAMS (5 km) ou par ARPEGE (50 km) et les valeurs observées dans 3 stations viticoles françaises (températures maximales de juillet ; période 1991-2000 ; $n=300$).